



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**STANOVENÍ VLIVU PŘÍMĚSI VODÍKU V  
ZÁŽEHOVÉM SPALOVACÍM MOTORU**

DETERMINATION OF HYDROGEN MIXTURE INFLUENCE ON INTERNAL  
COMBUSTION ENGINE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jiří Roušar

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

BRNO 2016



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: Jiří Roušar  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Stanovení vlivu příměsi vodíku v zážehovém spalovacím motoru

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá současným stavem spalovacích motorů s vnitřním spalováním vodíku a porovnáním s konvenčními komerčně dostupnými motory. Součástí práce jsou konstrukční úpravy konvenčního motoru pro spalování benzínu s příměsí vodíku a vedoucí k realizaci na reálném spalovacím motoru.

#### Cíle bakalářské práce:

- 1) Rešerše existujících řešení vodíkových motorů a srovnání s konvenčními motory
- 2) Návrh konstrukčních úprav konvenčního motoru pro použití ke spalování směsi benzínu a vodíku
- 3) Realizace navržených konstrukčních úprav

#### Seznam literatury:

STONE, Richard (1999): Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition, Palgrave, Hampshire, ISBN 0-333-74013-01999.

HEISLER, Heinz (2002): Advanced Engine Technology. Butterworth-Heinemann, Oxford, ISBN 1-56091-734-2.

SKOTSKY, Alexander A. (2009): Automotive Engines. Springer Verlag, ISBN 978-3-642-00163-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 23. 11. 2015



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan



## ABSTRAKT

Cíl bakalářské práce je porovnání vodíkového spalovacího motoru s konvenčními spalovacími motory a stanovení vlivu příměsi přidávaného vodíku do zážehového spalovacího motoru spalující benzín. Jsou představeny vlastnosti vodíku a jeho výroba a skladování. Rešerše návrhů konstrukčních úprav konvenčního benzínového spalovacího motoru s příměsí vodíku. Součástí práce je realizace technicky možných úprav u konvenčního spalovacího motoru.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Vodík, spalovací motor, vodíkový spalovací motor, elektrolýza

## ABSTRACT

The aim of the Bachelor thesis is comparing a hydrogen combustion engine with conventional combustion engines and determining the effect of added hydrogen to petrol combustion engine burning. The features of hydrogen are introduced, as well as its production, transportation and storage. The work contains a research of construction designs of a conventional engine modifications with an admixture of hydrogen. The realisation of technically possible modifications to the conventional engine is included in the thesis.

## KEYWORDS

Hydrogen, combustion engine, hydrogen combustion engine, electrolysis



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ROUŠAR, J. Stanovení vlivu příměsi vodíku v zážehovém spalovacím motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 58s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana doc. Ing. Pavla Novotného, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 02. května 2016

.....

Jiří Roušar



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu docentu Pavlovi Novotnému za jeho odborné rady a konzultace. Dále bych chtěl poděkovat rodičům, kteří mě podporovali nejen při studiu, ale také při psaní této práce.





## OBSAH

Úvod .....	11
1 Vodík .....	12
1.1 Výroba vodíku .....	15
1.1.1 Parní reforming zemního plynu .....	16
1.1.2 Elektrolýza .....	17
1.1.3 Vysokoteplotní elektrolýza .....	18
1.1.4 Termochemické cykly .....	19
1.1.5 Hybridní termochemické cykly .....	20
1.2 Vlastnosti vodíku .....	20
1.3 Skladování a přeprava vodíku .....	23
1.3.1 Konvenční skladování vodíku .....	24
1.3.2 Alternativní skladování vodíku .....	26
2 Spalovací motory s vnitřním spalováním vodíku .....	29
2.1 Výhody a nevýhody vodíkových motorů proti benzínovým .....	35
3 Současný stav spalovacích motorů s vnitřním spalováním vodíku .....	36
3.1 BMW .....	36
3.2 BMW HR2 .....	37
3.3 Ford .....	38
3.4 Mazda .....	40
3.5 Vícedruhové spalování paliv .....	42
3.5.1 HHO vyvíječe .....	42
3.5.2 Electro hydrogen generátor .....	43
4 Návrh konstrukčních úprav konvenčního motoru .....	44
4.1 Požadavky na spalovací motor .....	44
4.2 Úpravy konvenčního zážehového motoru .....	46
4.2.1 Návrh s přímým vstřikem vodíku .....	46
4.2.2 Návrh se směšovačem vodíku .....	47
5 Realizace .....	48
5.1 Výroba vodíku .....	48
5.2 Spalovací motor .....	50
5.3 Provedené úpravy .....	50
5.4 Vliv příměsí vodíku .....	51
6 Závěr .....	54
7 Použité informační zdroje .....	55
8 Seznam použitých zkratk a symbolů .....	58





## Úvod

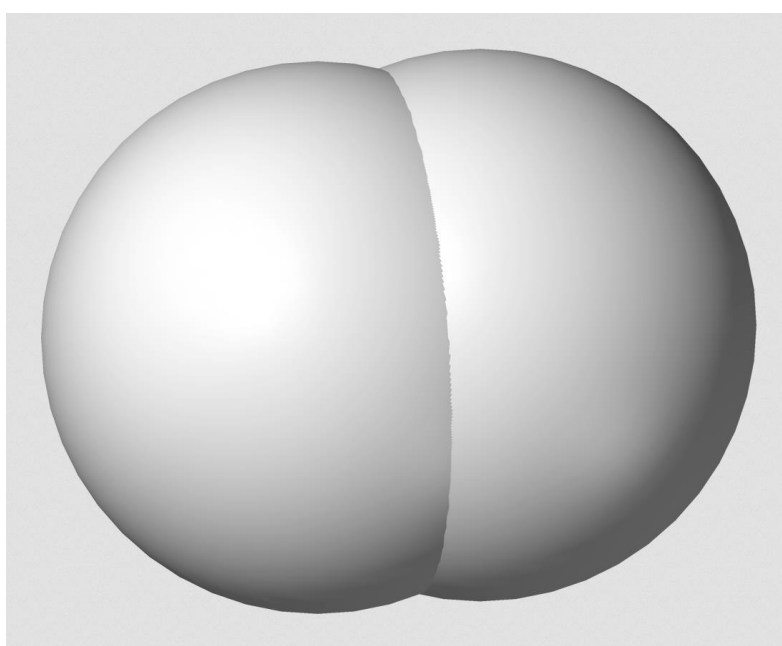
V automobilové dopravě dochází k nutným úvahám, plynoucí ze stále vyššího nároku na snížení škodlivých emisí v ovzduší a snižující se celosvětové zásobě ropy, hledání náhrady za stávající nejrozšířenější paliva spalovacích motorů na zemi. Negativním dopadem snižující se zásoby ropy obvykle vede ke zvyšující se ceně paliv, ale taky ostatních produktů z ropy vyráběných. Dlouhá řada vědců a inženýrů přišla s vlastním řešením náhrady, ale téměř vždy se tyto náhrady zastaví na jediném bodě, chybějící infrastruktura. Ta se v některých případech dokázala rozrůst o nová ekologická paliva, ovšem je to také spojeno s mírou osídlení dané lokality, poptávce a v neposlední řadě nabídce automobilů spalujících alternativní paliva a pořizovací ceně.

Práce se zabývá příměsí vodíku v zážehovém spalovacím motoru a vodíkovými motory, protože motory spalující vodík dnes nejsou žádnou novinkou na poli pohonných jednotek pro nejrozšířenější zástupce automobilové dopravy osobních automobilů, a přes to se využití tohoto paliva zdánlivě celoplošně uvízlo na mrtvém bodě. I přes značná množství druhů moderních paliv nabízená na trhu s pohonnými hmotami, a nutno dodat i technologicky méně náročná na jejich výrobu, se stále objevují vylepšené vodíkové spalovací motory a palivové články. V režimu zkušebního provozu se budují nové vodíkové čerpací stanice u velkých měst.

Můj zájem o vodíkové motory a všeobecně o vodík odstartovaly sdělovací prostředky, kde v reportážích informovaly o zařízeních instalovaná v automobilech snižující spotřebu benzínu na základě přidávaného vodíku do spalovacího motoru. K této zajímavé informaci je ovšem nutné poznat a pochopit, charakter vlastností vodíku. Zároveň nechci dělat touto prací a způsobem reklamu a obhajovat v jednom případě neschválené instalace zařízení domácích kutilů a ve druhém vyvíjející se technologii generátorů vodíku, ale zajímalo mě, proč se tato zařízení nestala sériovou záležitostí světových automobilek. Tedy v tom druhém případě zcela pochopitelně.

## 1 VODÍK

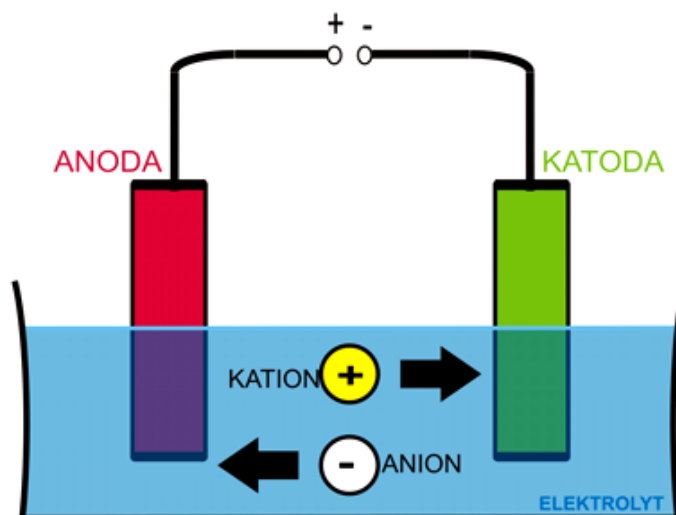
V plynné formě je vodík lehký bezbarvý plyn 14,38krát lehčí než vzduch, nemá chuť a zápach. Vodík hoří namodralým plamenem, ale nepodporuje hoření. Vedení tepla je 7krát lepší než u vzduchu a za normální teploty stabilní, slučuje se za pokojové teploty pouze s fluorem. Jeho reaktivita značně roste při zahřátí s kyslíkem a halogeny se slučuje za velmi bouřlivých reakcí, přičemž pro inicializaci reakce je nutná (např. jiskra, která zapálí kyslíko-vodíkový plamen). Vodík je pohlcován některými kovy např. v palladiu a ve vodě je velmi málo rozpustný. [1]



Obr. 1 Molekula vodíku [1]

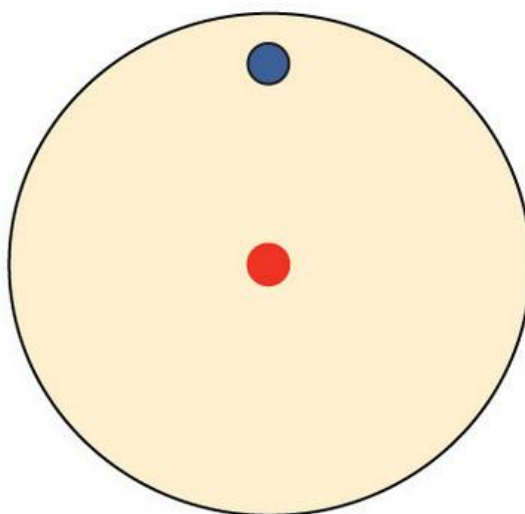
Velice malé molekuly vodíku umožňují procházet různými materiály, to má za schopnost „rozpouštět“ se v některých kovech, např. v palladiu nebo platině, které poté fungují jako katalyzátory reakcí.[1]

Vodík byl objeven roku 1766 Angličanem Henrym Cavendishem, který vypožadoval vznik bezbarvého hořlavého plynu při rozpouštění neušlechtilých kovů v kyselině. V roce 1781 jako první určil vodu, jako sloučeninou kyslíku a vodíku. Rozklad vody byla poprvé provedena Antoine Lavoisier v roce 1789 elektrolýzou.[1]



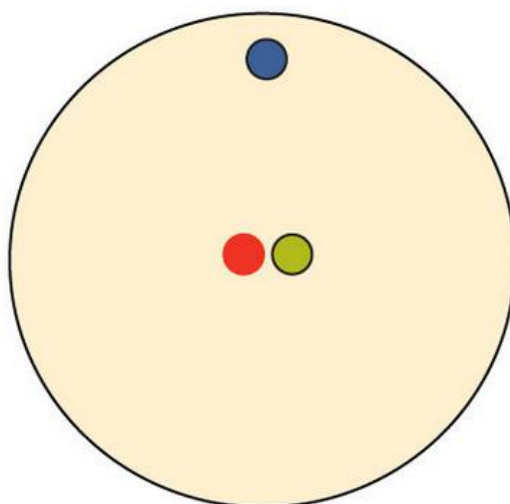
Obr. 2 Elektrolýza [2]

- **Vodík** – základní atom vodíku (občas nazývaný protium), je tvořen jedním protonem a jedním elektronem. Tento izotop vodíku je nejjednodušší atom ve vesmíru a tvoří jeho převažující část [1].



Obr. 3 Model atomu vodíku [3]

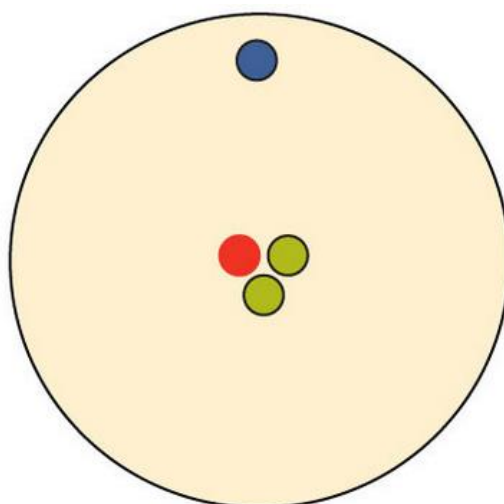
- **Deuterium** - atom s jádrem  $2\text{H}$  má v jádře jeden proton a jeden neutron a od běžného vodíku se liší hlavně atomovou hmotností, která je 2,01363 amu, se nazývá deuterium. Deuterium patří mezi stabilní izotopy, které nepodléhají radioaktivní přeměně. Ve spojení s kyslíkem tvoří deuterium tzv. těžkou vodu,  $\text{D}_2\text{O}$ . Tato sloučenina má význam v jaderném průmyslu. Je to velmi účinný moderátor, tedy látka zpomalující rychlost neutronů [1].



Obr. 4 Model atomu deuteria [3]

• **Tritium** - tritium se označí vodík  $3\text{H}$ , který má jádro složeno z jednoho protonu a 2 neutronů. Atomová váha má hodnotu 3,01605 amu. V porovnání s deuteriem je jádro tritia nestabilní a rozpadá se s poločasem rozpadu 12,4 roku, kdy vyzáří málo energetického beta záření.

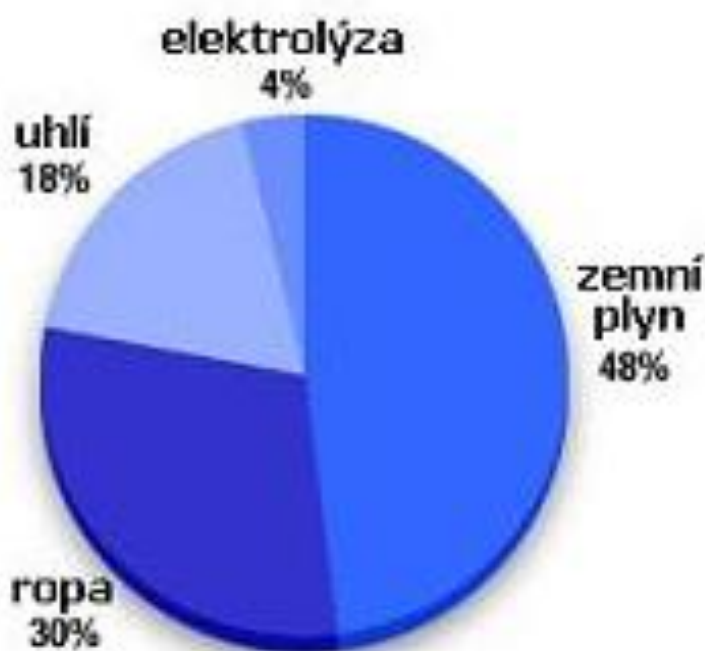
Za normálních podmínek vzniká tritium hlavně v horních vrstvách atmosféry při nárazu kosmického záření s jádrem atomu deuteria. Průmyslově se tritium získává z těžkovodních jaderných reaktorů při výrobě plutonia z přírodního uranu. Tritium jedna ze složek obsahu termonukleární bomby, současně nejničivějšího destrukčního prostředku, který člověk vyrobil. Tritium je zároveň jedním meziproduktem jaderné fúze, která se pokládá za energetický zdroj všech hvězd v pozorovatelné části vesmíru [1].



Obr. 5 Model atomu tritia [3]

## 1.1 VÝROBA VODÍKU

Vodík je možno vyrobit mnoha způsoby z celé řady vstupních zdrojů, avšak pouze ve výjimkách se budují jednotky pro výrobu vodíku pro pohon motorů. Jako nejrozšířenější produkci vodíku dominují v současné době petrochemické procesy z fosilních paliv. [4]



Obr. 6 Procesy a množství výroby vodíku z fosilních paliv. [4]

Spotřeba takto vyprodukovaného vodíku napomáhá lokálně snížit produkci jistých zdravotně závadných látek, na straně druhé to vede k méně hospodárnému využívání primární energie a s nárůstem produkce oxidu uhličitého.[4]

Jako další možností je výroba vodíku z obnovitelných zdrojů pomocí elektrolýzy vody, vysokoteplotního rozkladu vody anebo zplyňováním či pyrolýzou biomasy.

Dále vyvíjené jaderné reaktory čtvrté generace budou schopny produkce vodíku přímo z vody, kdy vysoká teplota chladiwa na výstupu z reaktoru bude postačovat pro některé perspektivní chemické cykly i vysokoteplotní elektrolýzu. [4]

## STRUČNÝ PŘEHLED NEJROZŠÍŘENĚJŠÍ TECHNOLOGIE VÝROBY VODÍKU

- Parní reforming zemního plynu
- Elektrolýza
- Vysokoteplotní elektrolýza
- Termochemické cykly
- S-I cyklus
- Hybridní termochemické cykly
- Westinghouse proces

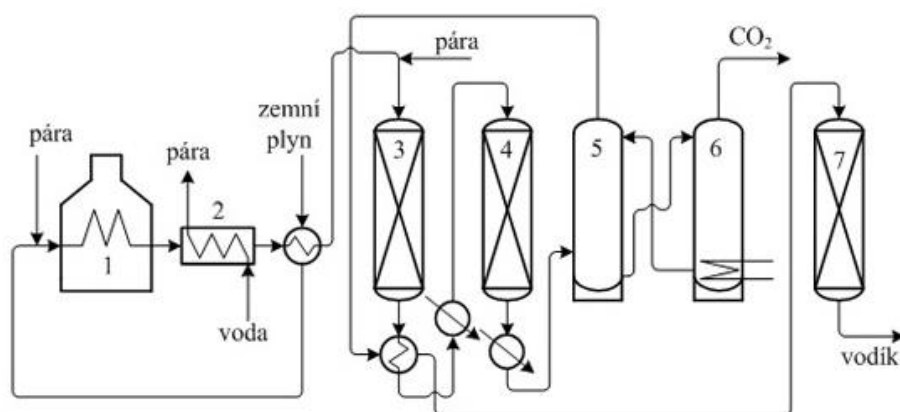
### 1.1.1 PARNÍ REFORMING ZEMNÍHO PLYNU

Technologie parního reformingu zemního plynu patří k nejrozšířenější a zároveň nejlevnější výrobě vodíku. Spalováním zemního plynu je vytvořeno teplo pro reformní reakci a následnou konverzi oxidu uhelnatého. [4]



Obr. 7 Procesy a množství výroby vodíku z fosilních paliv.[4]





Obr. 8 Schéma parního reformování zemního plynu (1 - pec, 2 - kotel na výrobu páry, 3 - vysokoteplotní konvertor CO, 4 - nízkoteplotní konvertor CO, 5 - absorbér CO<sub>2</sub>, 6 - desorbér CO<sub>2</sub>, 7 - metanizér)[5]

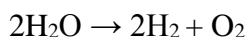
Technologický proces se skládá ze dvou fází; nejdříve se do vodní páry o teplotě a tlaku (500 - 950° C, 0,3 - 2,5 MPa) za přítomnosti katalyzátoru přivádí metan, který tvoří největší část zemního plynu. Tato směs metanu a páry produkuje vodík a oxid uhelnatý plus menší podíl oxid uhličitý za daných teplot a tlaků v reforméru. Druhá fáze navyšuje množství produkovaného vodíku konverzí CO z reforméru s další přidanou párou. Tato reakce probíhá už za nižších teplot. [4]

1. reformní reakce:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
2. konverze CO:  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Poměr páry a uhlíku ve směsi vychází účinnost produkce vodíku, která je okolo 80%. Dostí velkou nevýhodou je současně produkce oxidu uhličitého. Na jeden kilogram vodíku připadne 7,05 kg CO<sub>2</sub>. [4]

### 1.1.2 ELEKTROLÝZA

Elektrolýza je proces, která štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem průchodem stejnosměrného proudu vodným roztokem:



Vodík se v reakci na kladné elektrodě vytváří bublinky plynu, který je oddělován od bublinek kyslíku diafragmou jímán a následně skladován. Elektrolýza probíhá při pokojových teplotách a pro její chod je nutná pouze elektrická energie a účinnost se pohybuje kolem 80-92%. Produktem elektrolýzy je kyslík a vysoce čistý vodíkový plyn, bez nutnosti dodatečného dočišťování. Elektrolýzou jsou vyrobena přibližně 4 % z celkové světové produkce vodíku. [4]



Obr.9 Elektrolyzér [4]

K celkové účinnosti elektrolytické výroby vodíku se zohledňuje také účinnost výroby elektrické energie (30 - 40 % pro konvenční zdroje), tedy celková účinnost elektrolýzy se pohybuje přibližně v 25 - 35 %. [4]

### 1.1.3 VYSOKOTEPLTNÍ ELEKTROLÝZA

Vysokoteplotní elektrolýza je charakteristická tím, že část přivedené energie je elektrická energie a druhá část energie je dodána ve formě tepla. Proces probíhá ve vysokoteplotním elektrolyzáru a je reverzní na reakci, která probíhá v palivových článcích s pevnými oxidy. Vodík a pára vstupuje do elektrolyzáru, vystupuje z něj obohacená směs obsahující 75 % hmotnostních vodíku a 25 % hmotnostních páry. Z anody je oddělen iont kyslíku procházející membránou. Vodík se separuje z páry kondenzační jednotkou. [4]

Vysokoteplotní elektrolýza má za výhodu zvýšení účinnosti procesu díky menší náročnosti na elektrickou energii a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. S růstem teploty vstupující páry, klesá spotřeba elektrické energie. Celková energie mírně roste, což je způsobeno právě nutným ohřevem páry. Vysokoteplotní elektrolýza může dosahovat v celkové účinnosti až 45%. [4]

### 1.1.4 TERMOCHEMICKÉ CYKLY

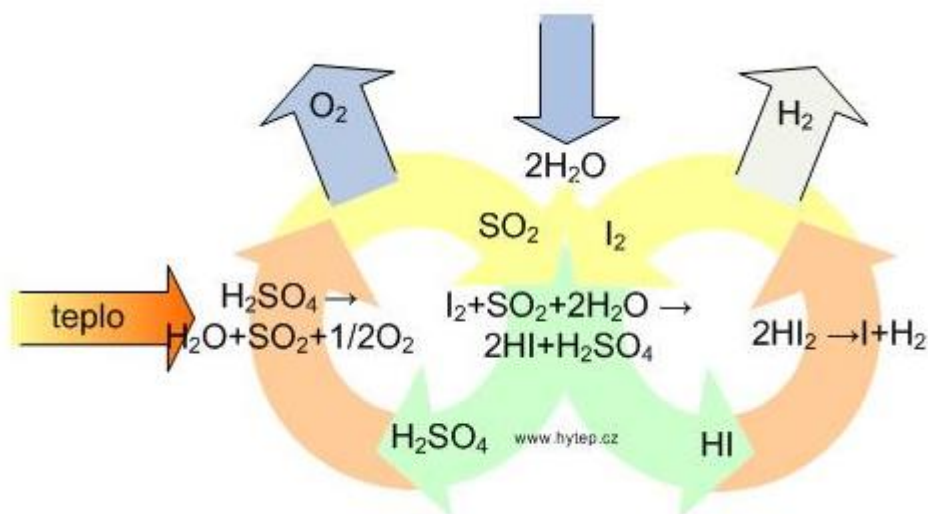
Jedná se o štěpení vody, kdy je voda rozdělena na kyslík a vodík pomocí několika chemických reakcí iniciované teplem nebo v procesech hybridních cyklů teplem a elektrickou energií. Cykly popisované níže jsou cykly uzavřené, tj. použité chemické látky jsou v průběhu reakcí recyklovány a znovu vstupují do procesu. Doplněnou vstupní surovinou je tedy pouze voda a výsledným produktem vodík a kyslík. Termochémickými cykly se zabývalo v 70. a 80. letech dvacátého století v době tzv. ropné krize. [4]

#### S-I CYKLUS

Jedná se o výrobu vodíku pomocí jaderné energie vyvinutý v polovině 70. let 20. století. Tento siřičito-jódový termochémický cyklus vyvinutý v General Atomics (San Diego, USA) je pokládán za levný a účinný proces výroby vodíku. [4]

Do tohoto procesu vstupuje voda a vysokopotenciální teplo. Na výstupu je to kyslík s vodíkem a nízkopotenciální teplo. Používané chemikálie, Jód a oxid siřičitý jsou recyklovány a následně opět používány. Teoreticky nedochází tímto postupem k vytváření žádného odpadu, ve skutečnosti dochází k určitým ztrátám, které se vyrovnávají doplňováním chemickými látkami. [4]

První reakcí, která je popsána jako Bunsenova reakce, reaguje vstupující voda s jódem a oxidem siřičitým při vzniku kyseliny sírové a jodovodíkové se z této exotermické reakce odvádí vzniklé teplo o teplotě 120° C. Pro endotermický rozklad kyseliny sírové je zapotřebí nejvíce tepla (o nejvyšší teplotě, 800 - 1000° C). Pro rozklad kyseliny jodovodíkové a tím současnou produkci vodíku se vyžaduje teplota nižší (450° C). [4]



Obr. 10 Siřičito-jódový termochémický cyklus [4]

S-I proces má vyšší účinnost než elektrolýza z důvodu odpadajícím ztrátám potřebným k výrobě elektrické energie. Samotná účinnost celého cyklu se obtížněji stanovuje a pohybuje se v rozmezí 40 - 52 % (50 % při 950° C). Se vzrůstající teplotou roste i účinnost cyklu.

K nevýhodám tohoto cyklu patří požadavek na vysoké vstupní teploty a agresivita chemických látek, tedy kyseliny sírové a jodovodíkové, které kladou vysoké nároky na chemickou odolnost použitých materiálů. [4]

### **1.1.5 HYBRIDNÍ TERMOCHEMICKÉ CYKLY**

Hybridní termochemický proces kombinuje termochemický cyklus a elektrolytické štěpení vody. Obecně se mohou hybridní cykly jevit jako nekonkurenceschopné kvůli potřebě elektrické energie a vysokým investičním nákladům na elektrolýzátor. Na druhou stranu s využitím elektřiny umožňuje hybridní cyklus chod nízkoteplotních reakcí a snižuje se počet chemických kroků (ty mohou zanechávat nečistoty ve vyrobeném vodíku a zvyšovat tak náklady na dodatečné čištění). [4]

## **WESTINGHOUSE PROCES**

Jde o hybridní cyklus kyseliny sírové a nese název po společnosti Westinghouse, která jej v roce 1975 vyvinula.

V reakci, do které vstupuje voda s oxidem uhličitým, se za přispění elektrické energie vytváří vodík a kyselina sírová. V dalších reakcích se rozpadá na kyslík a vstupující látky. [4]

Westinghouse proces má účinnost okolo 40 % a k výhodě procesu patří 3 - 4x nižší potřeba elektrické energie než při elektrolytickém štěpení vody. Je to nejjednodušší vývoj vodíku s použitím chemické látky kyseliny sírové, avšak tato metoda také vyžaduje chemicky odolné antikoroziční materiály. [4]

## **1.2 VLASTNOSTI VODÍKU**

Spalování vodíku jako palivo pro spalovací motory je možné, jako jiné běžné pohonné hmoty. Pomocí elektronického směšovacího zařízení lze spalovat zkapalněný nebo stlačený vodík, který upravuje směšovací poměr vodíku a vzduchu, převážně s přebytkem vzduchu. Směs s přebytkem vzduchu odebírá teplo, které má za následek nižší teplotu plamene pod kritickou mezí samozápalu a současně zamezuje vzniku oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ), které dále neutralizuje redukční katalyzátor. [6]



Vlastnost	Vodík
Hustota kapaliny (kg/m <sup>3</sup> )	70
Hustota plynu (kg/m <sup>3</sup> )	0,09
Výhřevnost (MJ/kg)	121
Teplota vznícení (°C)	570
Oblast zápalnosti při atmosferickém tlaku a 25°C (% obj.)	4,0 - 74,5
Rychlost laminárního plamene ve stechiometrické směsi (cm/s)	170
Stechiometrický poměr	34,5
Specifická energie směsi při $\lambda = 1$ (kJ/dm <sup>3</sup> )	2,92
Oktanové číslo výzkumnou metodou	60

Tab. 1 Vlastnosti vodíku [7]

### Vysoká rychlost šíření plamene

Vodík má oproti benzínu velkou rychlost šíření laminárního plamene, přibližně třikrát větší. Tato rychlost při spalování chudých směsí klesá. [7]

### Nízká energie

Většina směsí kapalných uhlovodíků má asi o 15% vyšší specifickou energii než vodík, ten má pouze 2,92kJ/dm<sup>3</sup>, takovýto motor má specifický výkon nižší, který se zvyšuje přeplňováním nebo přímým vstřikem kapalného vodíku do válce. [7]

### Široký rozsah zápalnosti

Rozsah zápalnosti se vzduchem od 4 do 75% objemu dovoluje spalování velmi chudých směsí a tím omezení vytváření zdravý škodlivých emisí. [7]

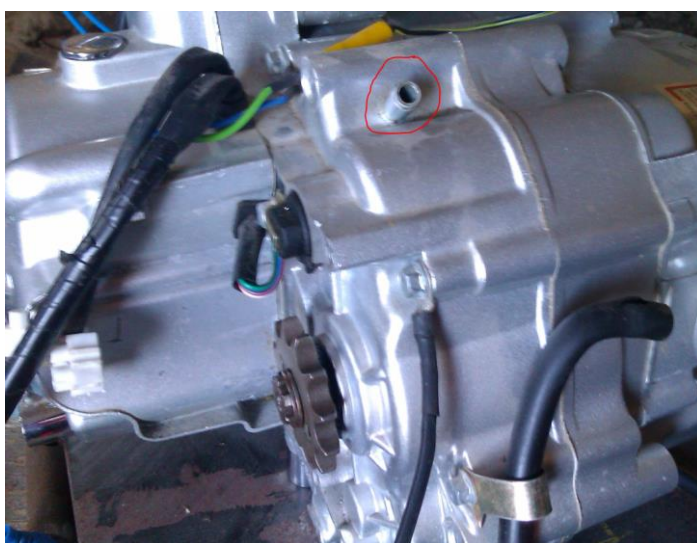
### Samozápaly

Silný sklon k samozápalům omezuje vodík k použití vyšších kompresních poměrů u motorů více než 7-8. Samovznícení má za následek vytvoření velmi silné tlakové vlny, které předejdeme chudou směsí nebo přidáním recirkulujícími výfukovými plyny. Samozápal také může vytvořit horká část spalovacího prostoru a to výfukový ventil nebo zapalovací svíčka. [7]

## Vysoká difuzivita

Malá velikost molekuly vodíku má za příčinu vysokou difuzivitu, která klade vysoké nároky na použité materiály při skladování, jejich těsnost a odolnost k tzv. vodíkové křehkosti. Atomy vodíku, které difundují do povrchu materiálu, se následně hromadí v určitých místech a může při zatížení iniciovat vznik trhlin. Vodíkovou křehkost podporuje přítomnost některých látek v prostředí, nejvíce voda, vlhkost, vodní pára nebo CO<sub>2</sub>. [8]

Motory spalující vodík musí mít dobře řešen odvětrání prostoru klikového hřídele z důvodu pronikání vodíku netěsnostmi mezi stěnami pístu a válce do prostoru klikového hřídele.



Obr. 11 Odvětrávací otvor klikového prostoru.



Obr. 12 Víko bubleru, účinek vodíku s vodou na nerezový materiál.



Vodík stoupá velmi rychle vzhůru díky své velmi malé hmotnosti, tedy uniká velmi rychle z okolí vozidla, při případném požáru by docházelo k hoření mimo automobil. Dalším kladem k bezpečnosti automobilů vybavených vodíkovým motorem je umístění nádrží na střechu karoserie. [9]



Obr. 13 Ukázka testu úniku vodíku ve srovnání s benzínem. [9]

### 1.3 SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVA VODÍKU

Skladování vodíku je kvůli jeho vlastnostem a to zejména nízkému bodu varu a prostupností materiálem, velice problematické a klade značné nároky na použité materiály a technologie, které zaručí bezpečnost a cenově dostupné skladování. Vývoj takových zařízení sehraje v budoucnu hlavní roli pro rozšíření vodíkové infrastruktury při přechodu na spalování alternativních paliv v automobilové dopravě. [10]

Skladování vodíku dělíme podle stupně vývoje na konvenční skladování a alternativní. Do konvenčního skladování vodíku patří tlakové nádoby pro plynný vodík. Kapalný vodík se uchovává v kryogenních nádobách. V alternativní technologii skladování nalezneme metalhydridy, komplexní hydridy a nanostruktury uhlíku. [10]

Pro porovnání skladovatelnosti vodíku v dané technologii je nutné sledovat několik parametrů a to:

- Hmotnostní kapacita
- Objemová kapacita
- Hustota energie

Hmotnostní kapacita je definována jako poměr hmotnosti vodíku vzhledem k hmotnosti celého systému, udávána v procentech [%hm]. [10]

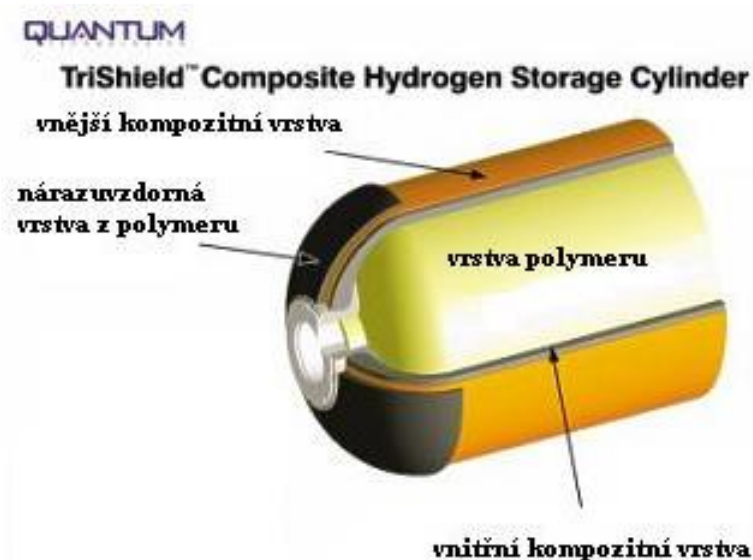
Objemová kapacita je definicí poměru hmotnosti vodíku k objemu systému, jednotkou je  $\text{kgH}_2/\text{m}^3$  příp.  $\text{gH}_2/\text{l}$ . [10]

Každé palivo má vlastní hodnotu výhřevnosti. Porovnáváme-li systémy s různými palivy je vhodnější místo objemové kapacity sledovat parametry hustoty energií, jednotkou je  $\text{kWh/l}$  popř.  $\text{kJ/l}$ . [10]

### 1.3.1 KONVENČNÍ SKLADOVÁNÍ VODÍKU

#### Skladování v plynné fázi

Skladování vodíku v bežešvých lahvích z nízkouhlíkaté nebo legované oceli, se využívá v případě, kde není potřeba se technologickou soustavou dále manipulovat a přemísťovat. Objem láhve pro běžné aplikace může dosahovat až 50 litrů, v případech mobilních aplikací se používá kompozitních tlakových nádob v objemech od desítek litrů, až do 300 litrů. Tlak do nádob stlačují pístové kompresory běžně v 350 bar. Vyvinutější aplikace dovolují 450 až 700 bar. [10]

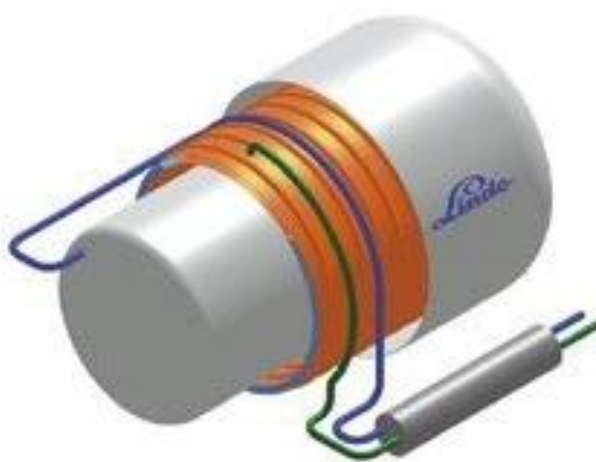


Obr. 14 Tlaková láhev pro uskladnění vodíku [10]



### Skladování vodíku v kapalně fázi

V kapalném stavu je vodík skladován při teplotě  $-253\text{ °C}$  v kryogenních nádobách, které se skládají z více vrstev tepelně izolačních materiálů. Zkapalňování vodíku nese s sebou vysoké energetické nároky a skladuje se za přetlaku 5 bar. Energie ke zkapalnění dosahuje přibližně 40 % energie v palivu. Kryogenní nádoby jsou vybaveny přetlakovým mechanismem, který odpouští vodík odpařený z důvodu postupného prostupu tepla z okolí a tím snižuje tlak uvnitř nádoby, který by mohl poškodit nádrž. [10]



Obr. 15 Nádrž pro kapalný vodík [10]



Obr. 16 Nádrž pro kapalný vodík [10]



Vodík se zkvalitňuje nejčastěji Claudovým procesem, který má následující kroky:

- Stlačení vodíku a odvedení kompresního tepla
- Předchlazení kapalným dusíkem
- Expanze v expanzní turbíně a s tím spojené ochlazení
- Expanze na Joule-Thomsově ventilu

Skládování vodíku konvenčními způsoby se staly za roky provozu ověřenými a bezpečnými systémy, ale technologický potenciál skládování je už takřka vyčerpán. [10]

### **1.3.2 ALTERNATIVNÍ SKLADOVÁNÍ VODÍKU**

Alternativní způsoby skládování vodíku spadají ještě do vývojové a výzkumné fáze a mají demonstrovat různé možnosti a limity systémů materiálů. Oproti konvenčnímu způsobu skládování, kde jejich technologické možnosti jsou už vyčerpány, se pravděpodobně alternativní způsoby skládování stanou možnou náhradou. [11]

#### **Hydridy**

Technologie uskladnění vodíku v hydridech spočívá na principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů při exotermní reakci. Při absorpci vodíku do materiálu se vyvíjí teplo. Naopak se při opačném ději - desorpce, kdy se uvolňuje vodík z materiálu, musí teplo dodat. U této technologie skládování se sleduje především teplota, při které dochází k desorpci vodíku z materiálu, hmotnostní kapacita absorbátoru (případně celého systému), objemová kapacita absorbátoru. [11]

#### **Metalhydridy**

Do podskupiny hydridů patří metalhydridy, kde u sloučenin s lehkými kovy jako je například magnesium, vychází celková hmotnost systému pouze o 30 % vyšší oproti systému skladující kapalným vodíkem. Dobré parametry kompenzuje dodání vysoké desorpční teploty, nízký tlak produkovaného vodíku a vysoká cena hydridu. [11]

#### **Alanáty**

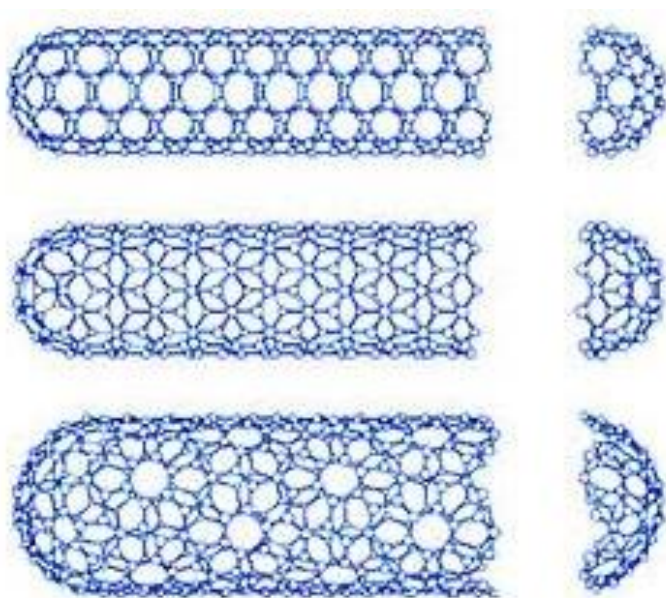
Alanáty jsou sloučeniny na bázi hliníku a řadí se mezi reverzibilní komplexní hydridy s vysokou hmotnostní i objemovou kapacitou. U alanátů je limitující poměrně vysoká cena hydridu a vysoká desorpční teplota (nad 150 °C). [11]

## Uhlíkaté struktury

Do uhlíkatých nanostruktur patří vysokoporézní grafit a uhlíkaté nanotrubičky. Vědci zaměřují svoji pozornost na studium nanotrubic s jednoduchou stěnou, které mají velký potenciál pro skladování vodíku. Hodnoty hmotnostní kapacity adsorbovaného vodíku v nanostrukturách uhlíku se dle jednotlivých studií pohybují v rozmezí 0,4 - 7 % hm. [11]

### Uhlíkové nanotrubičky

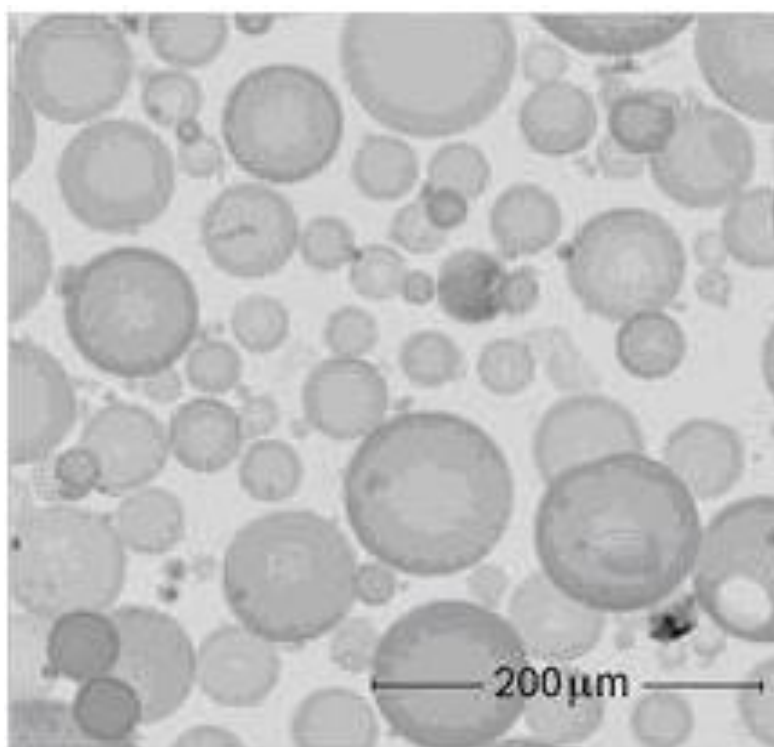
Základem skladby uhlíkaté nanotrubičky je grafit, který je formou uhlíku a má atomy tvořící šestiúhelníkovou krystalovou mříž. Nanotrubičky tvoří jednu nebo několik vrstev stočených do trubice. Průměr trubic se pohybuje od 0,7 - 3 nm. [11]



Obr. 17 Uhlíkové nanotrubičky [11]

### Skleněné mikrokuličky

Vodík je skladován do skleněných mikrokuliček z křemičitého dutého skla, MgAlSi skla nebo polyamidu. Rozměry kuliček bývají 25 - 200  $\mu\text{m}$  s tloušťkou stěny 0,5 - 20  $\mu\text{m}$ . Umožňují uskladnit plynný vodík až do tlaku 100 MPa difúzí molekul vodíku skrze stěnu při teplotě (200  $^{\circ}\text{C}$ ) a vysokého tlaku. Vodík se z kuliček uvolňuje zvýšením teploty. [11]



*Obr. 18 Skleněné mikrokuličky [11]*

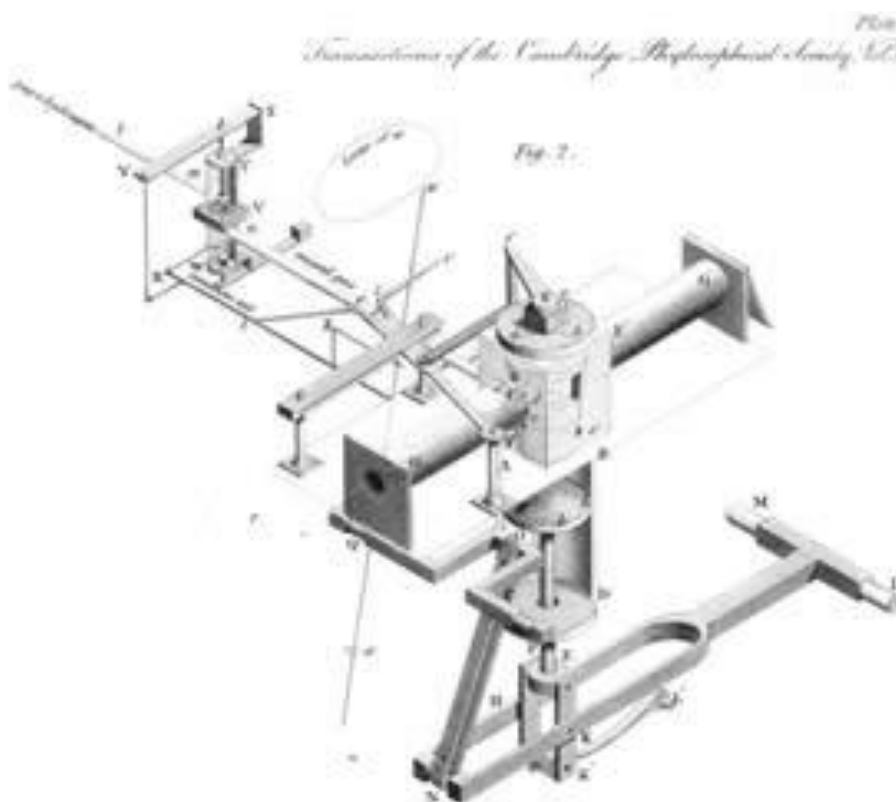
Technologie uskladnění vodíku na bázi uhlíkatých nanostruktur a skleněných mikrokuliček jsou stále ve fázi vývoje a výzkumu.[11]

## 2 SPALOVACÍ MOTORY S VNITŘNÍM SPALOVÁNÍM VODÍKU

### Historie motorů s vnitřním spalováním vodíku

První pístový motor spalující vodík sestrojil roku 1806 Francois Isaac de Rivaz. Motor již používal ke vznícení směsi vzduchu a plynného vodíku zapalovací svíčku. Motor získal roku 1808 patent a je považován za první spalovací motor, avšak jeho další rozvoj už nepokračoval. [12]

Reverend W. Cecil byl další konstruktér motoru spalující vodík, který v roce 1820 zveřejnil svoji knihu *On the application of hydrogen gas to produce a moving power in machinery*. V knize popsal motor, který je poháněn s pomocí atmosférického tlaku a podtlaku vzniklého explozí po smíchání vodíku a vzduchu. Motor byl funkční, ale i tak se vakuové motory v praxi nikdy neujaly. [13]



Obr. 19 Vakuový motor spalující vodík [13]

Vodíkové spalovací motory byly dále instalovány od 20. let minulého století na vzducholodích při transatlantických letech. Byly používány vzducholodní motory Maybach a Ricardo. [14]

V podstatě existují dvě možnosti, jak využít energii uloženou ve vodíku. První možností je spalování vodíku v upravených konvenčních benzínových spalovacích motorech. Druhou možností je využití energie z vodíku formou elektrické energie, která probíhá v palivových článcích, ke kterým se konstruktéři světových automobilek přiklánějí stále více pro jejich vysokou účinnost a nulové emise při provozu vozidla.

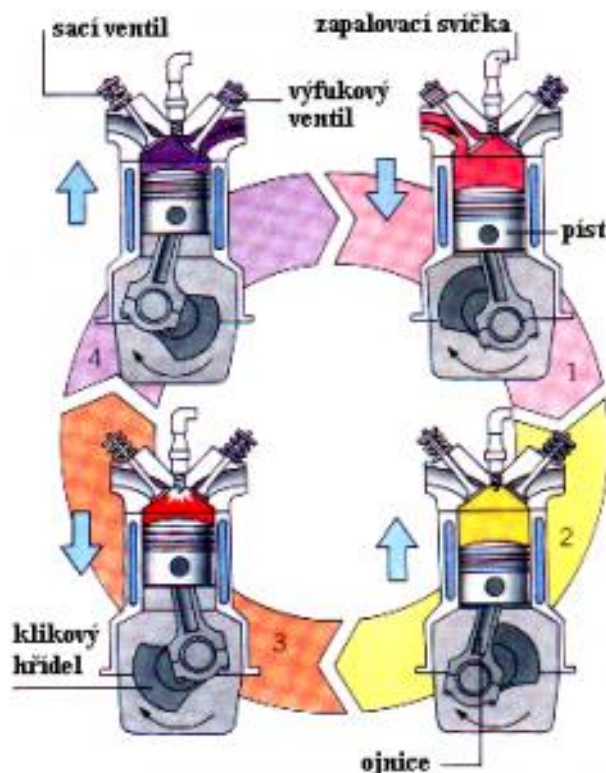


*Obr. 20 Palivový článek [15]*

### **Vodíkový motor**

Vodíkový spalovací motor vychází ze základu upraveného konvenčního zážehového spalovacího motoru v angličtině označován jako hydrogen internal combustion engine (HICE). Motor takto stejně pracuje v kruhovém ději Ottovým cyklem. Pracovní doby čtyřdobého spalovacího motoru se skládá ze 4 fází:

- Sání
- Komprese
- Expanze
- Výfuk



Obr. 21 Pracovní oběh čtyřdobého spalovacího motoru

### Stechiometrický poměr

Zážehový motor vyžaduje pro svoji správnou činnost určitý poměr vzduchu a paliva. Úplné spalování vodíku nastává při teoreticky ideálním poměru 34 kg vzduchu na 1 kg paliva. Toto složení směsi vyžaduje určitou korekci při různých režimech chodu motoru. Měrná spotřeba paliva zážehového motoru je tedy značně závislá na směšovacím poměru vzduchu a paliva. V reálném provozu je pro úplné spalování a zároveň nejmenší spotřebu vyžadován přebytek vzduchu v rozmezí zápalnosti paliva a použitelnou dobou hoření. [6]

Srovnáním stechiometrického poměru vodíkové palivové směsi s poměrem benzínu, který je v poměru 14,7:1, vychází stechiometrický poměr vodíku přibližně dvakrát větší. Vodík jako plynné palivo zaujímá ve spalovacím prostoru asi 29% objemu, což je dáno jeho malou objemovou výhřevností, zatímco kapalný benzín pouhých 1-2%.

### Různá rychlost hoření

Vodík hoří velmi rychle řetězovou rozvětvenou reakční kinetikou, plamen vodíku je v důsledku vysoké výhřevnosti stabilní i při velmi chudé směsi, čehož se využívá ke snížení nežádoucích emisí. Rychlost hoření směsi je 3x rychlejší nežli hoření směsi s benzínem, ale při spalování chudých směsí se rychlost hoření směsi snižuje. [14]



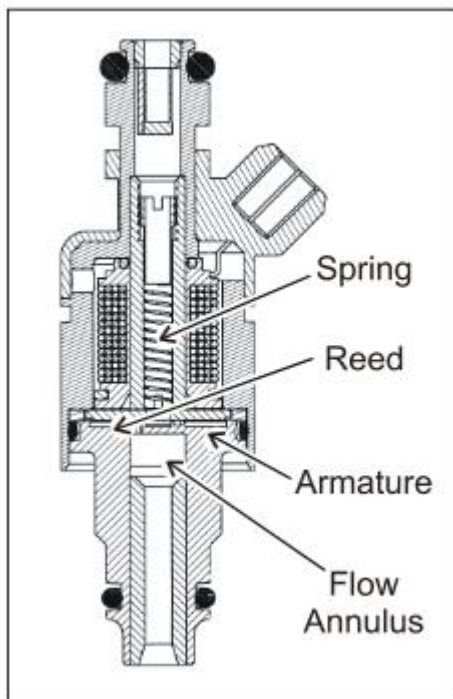
## Plnění vodíkových motorů

Plnění vodíkových motorů přináší veliké riziko v podobě předčasného zapálení směsi, které se může projevit šlehnutím do sacího kanálu. K zapálení vodíkové směsi stačí kontakt s horkým místem motoru nebo kontakt se spaliny z vnitřní recirkulace motoru. Základem by měla být optimalizovaná hlava válce pro ideální nasměrování dráhy proudu nasávané směsi do válce motoru s dostatečným odstupem od stěn válce. [14]

V podstatě k plnění spalovacích motorů vodíkovou směsí můžeme použít třech známých způsobů jako u spalovacích motorů spalující benzín, kterými jsou centrální vstřík do sacího potrubí, vícebodový vstřík, kde je v každém potrubí umístěn vstříkovací ventil nebo přímý vstřík vodíku do válce, až při kompresním zdvihu pístu. Tímto způsobem bylo ve Výzkumném centru Josefa Božka, ale i v zahraničí úplně odstraněno obávané zpětné šlehnutí do sacího potrubí. Při tomto způsobu plnění se také ukázalo, že lze využít poměrně vysoký kompresní poměr. [14]

### Centrální vstřík

Dodávání paliva do motoru prostřednictvím upraveného karburátoru, směšovače nebo centrálního systému vstříkávání. Vodík je vstříkván na jediném místě v sacím potrubí v průběhu sací fáze cyklu motoru. Nevýhodou karburátoru, směšovače a centrálního vstříkávání je větší náchylnost k předčasnému zapálení směsi. Tento systém také neposkytuje takový výkon jako třeba systém přímého vstříkávání vodíku. [16]



Obr. 22 Vstříkovací ventil [16]

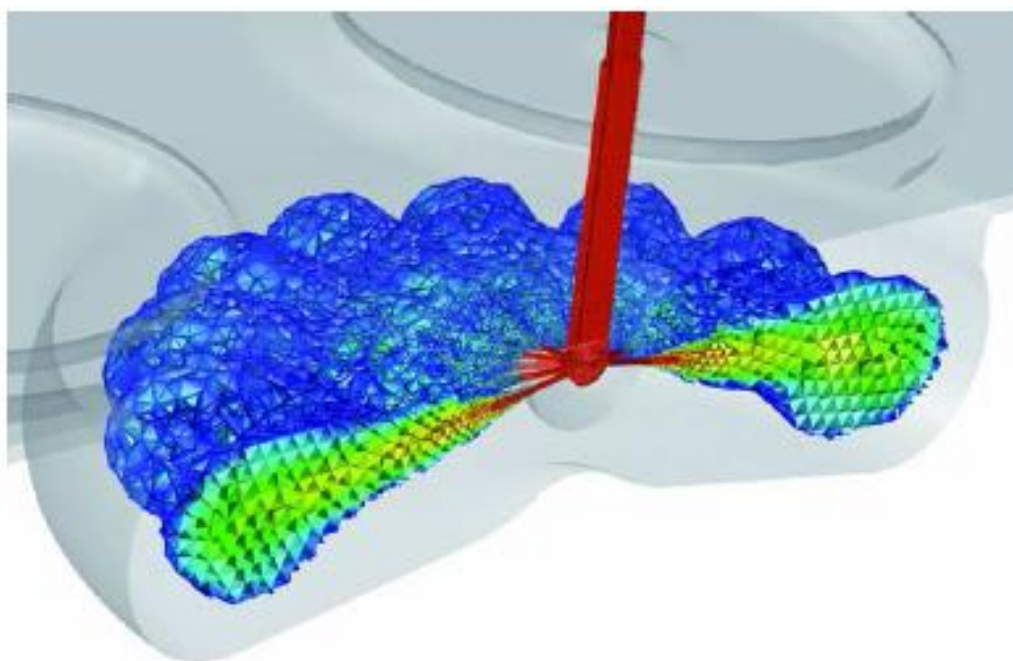


### Vícebodový vstřík

Zdokonalený způsob tvorby palivové směsi než centrální vstřík vodíku, kdy palivová směs vzniká v sacím potrubí, ale na více místech, před každým sacím ventilem. Vstřikování vodíku probíhá až po započetí sacího zdvihu, kdy čistý vzduch ještě vytlačí spaliny a ochladí horká místa. To značně omezí možnost vznícení směsi před vlastní iniciací zapalovací svíčky. Tlak vstřikovačů je vyšší než u centrálního vstřikování, avšak menší než u přímého vstřikování vodíku. [16]

### Přímý vstřík

Nejlepší variantou palivovým systémem je přímé vstřikování paliva. Vstřikování paliva se děje až při kompresním zdvihu pístu, kdy je sací ventil uzavřen a palivo je vstříknuto přímo do válce. Tak je zamezeno předčasnému zapálení směsi a také zpětnému zášlehu. Výkon motoru s přímým vstřikováním paliva je oproti centrálnímu vstříku asi o 42% vyšší a o 20% vyšší než výkon motoru spalujícího benzín. Vodík je vstřikován do válce pod vyšším tlakem než u předchozích způsobů. [16]



*Obr. 24 Simulace přímého vstřikování vodíku [17]*

## Výkon vodíkových motorů

Maximální teoretický výkon motoru spalující vodík je závislý na stechiometrickém poměru, který je 34:1 a použitím systému vstřikování paliva. V takovém poměru vodík zastupuje ve válci 29% prostoru a vzduch zbývajících 71%. Porovnáním s benzínem v jeho kapalně formě zastupuje ve válci asi pouze 1-2% objemu. Potom výkon tohoto motoru je vyšší než výkon motoru spalujícího vodík. Tyto hodnoty zastupují systém vstřikování vodíku při centrálním a vícebodovém vstřikování, tedy kdy palivová směs se mísí před vstupem do válce, dosahuje 85% výkonu oproti benzínovému motoru. V případě přímého vstřikování paliva, lze dosáhnout o 15% vyšší výkon než motor spalujícího benzín. [16]

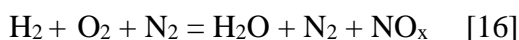
V případě spalování ideálního poměru 34:1 směsi dochází k vysokým spalovacím teplotám, které produkují vysoké koncentrace škodlivých  $\text{NO}_x$ , které jsou právě z hlediska použití vodíku jako ekologického paliva nežádoucí. K předjetí tohoto negativního jevu je vodík spalován v chudší směsi, které redukuje tento nežádoucí jev téměř na nulu. V případě chudší směsi je výkon menší, proto mají vodíkové motory nižší výkon na objem motoru než benzínové motory. Menší výkon se u vodíkového motoru řeší přepínáním turbodmychadly. [16]

## Emise vodíkových motorů

Produktem spalování vodíku s kyslíkem je pouze čistá voda dle rovnice:



Reálně spalovací motory spalují vzduch s vodíkem, kde se vyskytuje i dusík, tedy rovnice bude ve tvaru:



Oxidy dusíku jsou výsledkem spalování při vysokých teplotách.

Množství  $\text{NO}_x$  závisí na:

- stechiometrickém poměru
- kompresním poměru motoru
- otáčkách motoru
- časování zapalování

Ve výfukových plynech se kromě oxidů dusíku také mohou objevit stopové množství oxidů uhlíku ( $\text{CO}_x$ ), ty vznikají spalováním motorového oleje prolínajícího mezi stěnami válce do spalovacího prostoru. Provozní podmínky dokážou ovlivnit vodíkový motor v produkci jak téměř nulových emisí, tak i velkých koncentrací oxidů dusíku. [16]

## 2.1 VÝHODY A NEVÝHODY VODÍKOVÝCH MOTORŮ PROTI BENZÍNOVÝM

Jednotlivé vlastnosti vodíku byly podrobněji popsány v kapitole 1.2, proto budou nyní zmíněny kratší formou související se spalovacím motorem.

Výhody vodíkových motorů:

- Široký rozsah hořlavosti. Lze spalovat vodík i v extrémně chudých směsích oproti benzínu.
- S vysokou teplotou samovznícení vodíku můžeme motoru přidat vyšší kompresní poměr. Tím bude lepší tepelná účinnost cyklu a vyšší výkon motoru.
- Snadné smíchání vodíku se vzduchem při nasávání do válce. Benzín se musí nejdříve odpařit a potom smíchat, což vede k problémům při startech v zimním období.
- Nízké emise výfukových plynů.
- Nevyčerpatelný zdroj vodíku.

Nevýhody vodíkových motorů:

- Nízká iniciační energie vedoucí k předčasnému zapálení směsi.
- Vysoká difuzivita, tedy vysoké požadavky kladené na palivový systém a materiály.
- Nízká hustota, tedy vyšší spotřeba paliva vyžaduje objemnější rozměr palivové nádrže.
- Neexistující dostatečná výroba vodíku, která by pokryla poptávku automobilové dopravy.
- Slabá infrastruktura čerpacích stanic.
- Přeprava kapalného vodíku vyžaduje jeho ochlazení na  $-253^{\circ}\text{C}$ .

Z výše uvedených charakteristických vlastností vodíkových motorů je zřejmé, že s vodíkem jako palivem se v budoucnu budeme setkávat. Pro přední výrobce automobilů, kteří se zabývají vývojem vodíkových spalovacích motorů testující své prototypy je limitující zatím slabá infrastruktura vodíkových čerpacích stanic a nároky související s přepravou. Nadále se zdokonalující vodíkové technologie sebou přináší nezadržitelný pokrok, do kterého patří i vývoj vodíkových palivových článků PEM, které svými vlastnostmi a bezproblémovým provozem překonávají spalovací motory. K nevýhodě palivovým článkům ovšem patří zatím jejich velká cena, která stojí za kusovou výrobou a použitými speciálními materiály pro odolání v korozivním prostředí. Další nevýhoda palivových článků je neschopnost dodat okamžitý potřebný výkon elektromotoru na podnět řidiče.

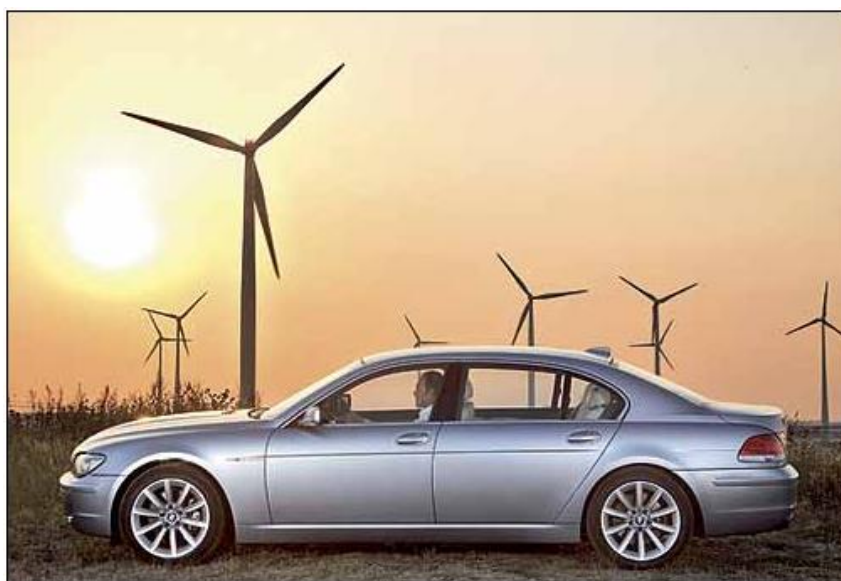
### 3 SOUČASNÝ STAV SPALOVACÍCH MOTORŮ S VNITŘNÍM SPALOVÁNÍM VODÍKU

Předními automobilkami vyvíjející technologie spalování vodíku v pístových motorech jsou BMW, Ford a Mazda, kteří už řadu let představují své prototypy a výsledky výzkumu široké veřejnosti.

#### 3.1 BMW

Německý výrobce automobilů BMW vycházel pro svůj prototyp vodíkového spalovacího motoru BMW Hydrogen 7 z upraveného konvenčního benzínového motoru modelu řady 7. Automobil je jedním z prvních modelů schopný spalovat dvojí palivo, jak benzín, tak i vodík. [18]

Základem BMW Hydrogen 7 je dvanáctiválcový čtyřdobý zážehový motor s válci do V objemu 5 972 cm<sup>3</sup>. Motor s dvoupalivovým systémem má celkový výkon 260 koní. Proměnlivou délku sání a variabilní časování ventilů pro sání a výfuk v obou hlavách motoru systému Valvetronic. [18]



Obr. 24 BMW Hydrogen 7 [18]

Při provozu motoru na benzínové palivo je benzín vstřikován přímo do válce, oproti provozu na vodík, kdy je směs vstřikována do sacího potrubí. Vodíková nádrž má vynikající izolační vlastnosti. Konstruována je jako kryo-kontejner a její izolace odpovídá 17m polystyrenu. Kapalný vodík postupem v palivovém potrubí ke vstřikovacím ventilům zahřívá a přechází do plynného skupenství. Kapacita nádrže je 168 l a pojme až 8 kg kapalného vodíku, což odpovídá nádrži o objemu 30l benzínu. Kapacita nádrží umožní dojezd vozidlu 200 km na vodík a dalších 500 km na benzínové palivo. [18]

Maximální rychlost, kterou je Hydrogen 7 schopen dosáhnout je 230 km/h a zrychlení má z 0-100 km/h v čase 9,5 sekundy. [18]



Obr. 25 Dvanáctiválcový motor BMW Hydrogen 7 V12 [18]

### 3.2 BMW HR2

Druhým zástupcem německé automobilky je prototyp BMW H2R, který byl navržen k překonání rychlostních rekordů mezi vozidly s vodíkovým pohonem. Vůz pohání stejná pohonná jednotka jako u BMW Hydrogen 7. Výroba vozu zabrala technikům pouhých 10 měsíců. Vůz má hliníkový rám a karbonovou karosérii s odporem vzduchu  $C_x=0,21$ . Motor upravený na vodík dosahuje výkonu 210 kW. Modifikace motoru jsou v úpravách spalovacího prostoru hlavách válců a speciální vodíkové vstříkovače. Model H2R pohání pouze vodík. [19]



Obr. 26 BMW HR2 [19]





Prototyp HR2 vlastní 9 rychlostních rekordů a dosáhl maximální rychlosti 302,4 km/h, start z 0-100 dosáhl v čase 6 vteřin.

	time in sec	speed in kph
Flying-start kilometer	11.993	300.190
Flying-start mile	19.912	290.962
Standing-start 1/8 mile	9.921	72.997
Standing-start 1/4 mile	14.933	96.994
Standing-start 1/2 kilometer	17.269	104.233
Standing-start mile	36.725	157.757
Standing-start 10 miles	221.052	262.094
Standing-start kilometer	26.557	135.557
Standing-start 10 kilometers	146.406	245.892

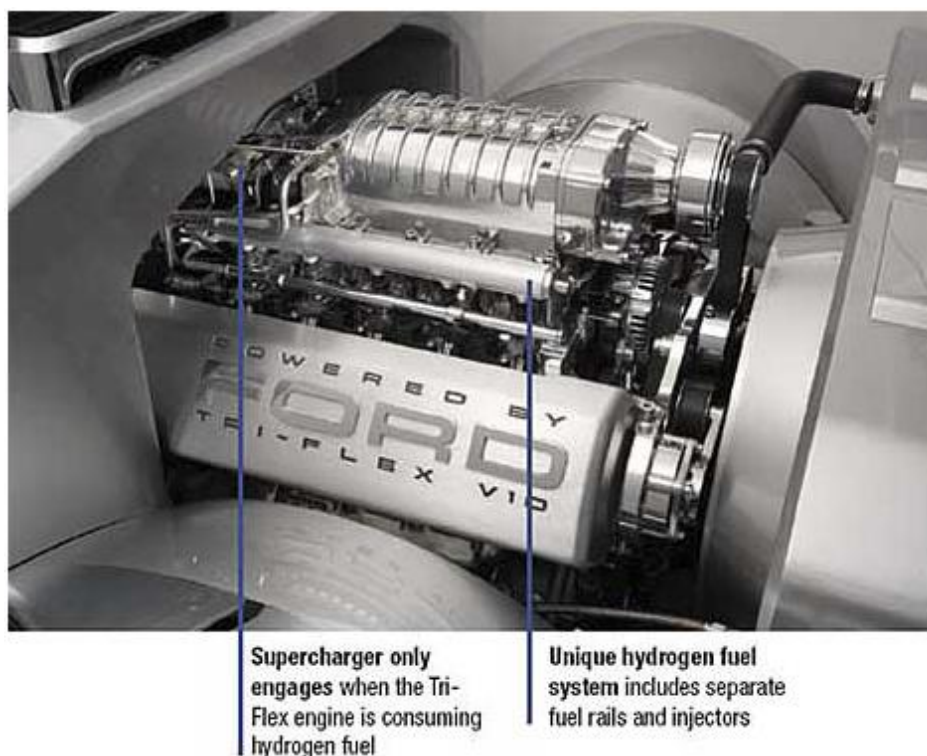
Tab. 3 Přehled rekordních časů dosažených BMW HR2 [19]

### 3.3 FORD

Společnost Ford nedávno představila prototyp nákladního auta Ford F-250 Super Chief, kde konstruktéři předvedli nový přeplňovaný motor V10 s palivovým systémem tri-flex, který dává svým majitelům vybrat ze tří druhů paliv. Řidič si pomocí flip přepínače může vybrat mezi palivem E85, vodíkem nebo benzínem. Ford F-250 Super Chief má na vodík dojezd 804 km a kroutící moment činí 542 N.m. [20]



Obr. 27 Ford Super Chief F-250 [20]



Obr. 28 Motor Ford Super Chief F-250 [20]

U autobusů s motorem spalující vodík má zástupce Ford s názvem H<sub>2</sub>ICE Shuttle Bus. Základ vychází z přestavby sériového modelu Ford E-450, na jehož šasi je umístěna skříň autobusu. Tento autobus byl poháněn přeplňovaným motorem 6,8 l Triton V-10, který byl upravený pro spalování vodíku. Motor poskytuje maximální výkon 140 kW v rozmezí otáček 2600-3600. Model H<sub>2</sub>ICE Shuttle Bus byl představen poprvé v roce 2004. Autobus je pojme 12 cestujících včetně řidiče a zavazadly. Autobus má jízdní dosah okolo 240 km, přičemž záleží i na zatížení vozu. [21]



Obr. 29 Autobus H<sub>2</sub>ICE Shuttle Bus [21]

### 3.4 MAZDA

Mazda má jako jediná automobilka motor spalující vodík s rotačním pohybem pístu, která Wankelův motor používá ve svých sériových vozech. Významnou roli ve vývoji vodíkových vozidel zastal model, představený v roce 2003 na Tokijském autosalonu vycházející ze sériového sportovního modelu motoru Renesis. Motor má dvoupalivový systém s přepínáním mezi vodíkem a benzínem nazývaný Dual-Fuel. Byly přidány i dva vstřikovače vodíku přímo do rotorových komor. Největší problém představoval markantní rozdíl výkonu při spalování vodíku a benzínu. Velkým kladem byl provoz bez emisí, když z výfuku odcházela samotná vodní pára. V roce 2004 jízdní zkoušky dosáhly schválení pro provoz na pozemních komunikacích a od roku 2006 začalo komerční pronajímání vodíkových vozidel. [22]



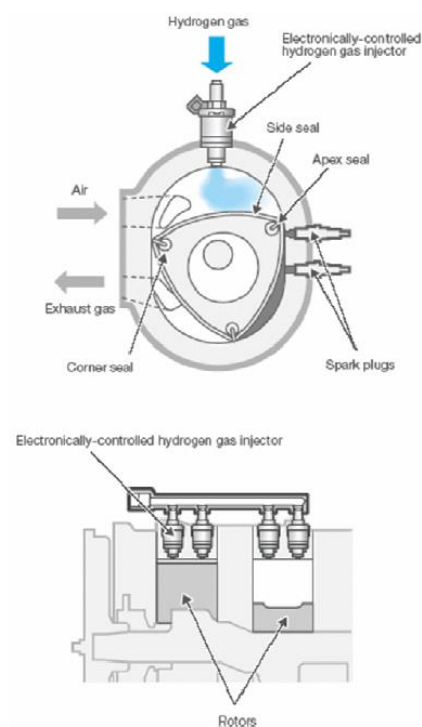
*Obr. 30 Motor s rotačním pístem [22]*

Upravený Wankelův motor pro spalování vodíku má zásadní výhodu oproti benzínovému pístovému motoru v tom, že u Wankelova motoru nedochází k zpětnému zášlehu do sacího potrubí, díky oddělené sací a spalovací části prostoru rotujícím pístem. Na přestavbu z konvenčního motoru na motor vodíkový, musela být modifikována poloha, počet a velikost sacích a výfukových otvorů. Byla snížena hmotnost rotačních pístů a osadit motor novými vstřikovači paliva. Na každý spalovací prostor jsou umístěny dva vstřikovače, který provede několik vstřiků vodíku na jednoho otočení pístu za účelem dodání potřebného množství vodíku. [22]





Obr. 31 Prototyp Mazda RX-8 Hydrogen RE [22]



Obr. 32 Motor Renesis Hydrogen 13B Dual –Fuel [23]

### Mazda RX-8 Hydrogen RE

Čtyřsedadlové kupé od Mazdy, model ABA-SE3P Kai, má vpředu podélně uložený dvourotorový Wankelův motor Mazda RENESIS Hydrogen 13B Dual-Fuel, s objemem 2x 654 cm<sup>3</sup>. Parametry motoru jsou s výkonem a točivým momentem 80 kW (109 k) při 140 N.m dosahovány na vodík a 154 kW (210 k) při točivém momentu 222 N.m na benzin. Objem nádrže pro benzin je 61 l a objem vysokotlakých vodíkových nádrží 110 l při tlaku 35 Mpa. Dojezd se pohybuje při spalování vodíku 100 km a dojezd na benzin 550 km. [22]

Nejnovějším vozem spalující vodík od Mazdy je model Premacy Hydrogen RE Hybrid, který používá taktéž motor jako model RX-8, Hydrogen RE. Takovéto hybridní vozidlo kombinuje elektromotor s vodíkovým rotačním motorem. Spalovací motor slouží pouze ke generování elektrické energie, kterou využívá elektromotor k pohonu kol. Hybridní systém zvyšuje dojezd při spalování vodíku na 200 km, který dvakrát přesáhne model RX-8 Hydrogen RE. [24]

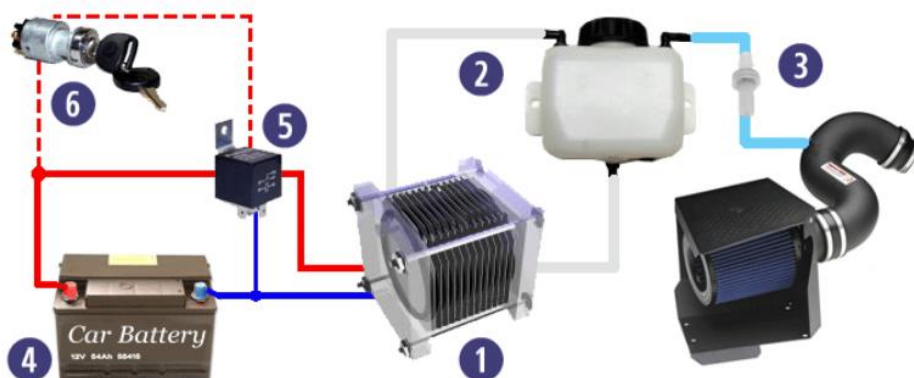


*Obr. 33 Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid [24]*

### 3.5 VÍCEDRUHOVÉ SPALOVÁNÍ PALIV

#### 3.5.1 HHO VYVÍJEČE

Posledních pár let se začaly v našich médiích objevovat zprávy o neschválených úpravách zážehových a vznětových motorů s neschválenými komponenty výrobců automobilů na základě obohacování směsi benzínového paliva o vodík, pomocí HHO (Hydrogen + Hydrogen + Oxygen) vyvíječů, tedy výroby vodíku, k dosažení úspory paliva a zvýšení výkonu. Základem celého zařízení je elektrolýza, která využívá přebytek elektrické energie z alternátoru motoru k rozkladu vody na směs plynů kyslík a vodík, nazývaný Brownův plyn. Množství vyprodukovaného vodíku tímto způsobem ovšem není natolik velké, aby se dalo dosáhnout výrazné úspory paliva nebo dokonce úplného chodu motoru pouze na vodík z tohoto zařízení. [25]

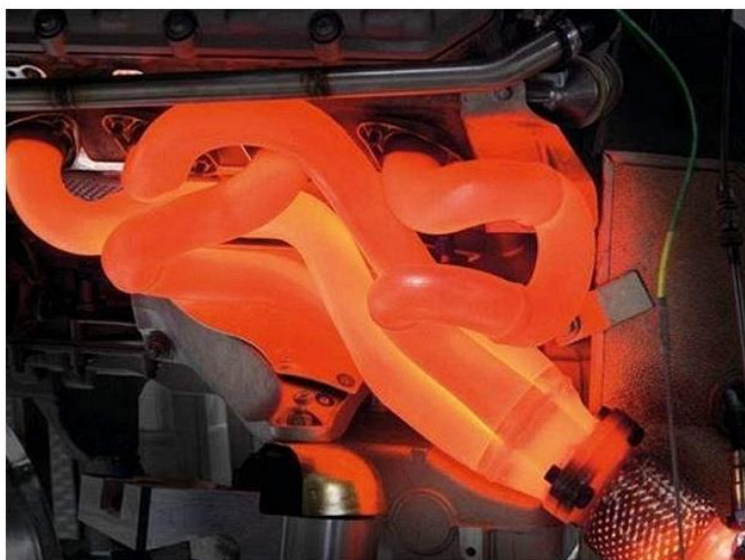


(1)HHO článek, (2)odlučovač - rezervoár na elektrolyt, (3)jednocestý ventil, (4)autobaterie, (5)relé pro ovládání přívodu elektrického proudu, (6)skříňka zapalování.

Obr. 34 Schéma zapojení HHO u automobilu [25]

### 3.5.2 ELECTRO HYDROGEN GENERÁTOR

Do světa automobilové dopravy přispěla britská společnost OM Energy, která vyvíjí elektro-vodíkový generátor umožňující vyrábět vodík za pomoci odpadního tepla přímo v automobilu. Vodík potom bude vůz využívat jako příměs do paliva. Tím se sníží spotřeba stávajícího paliva a klesnou emise. Electro hydrogen generator (EHG) firma vyvíjí déle než čtyři roky a získala na další vývoj investici od společnosti Ultra Green Group. Principem EHG je výroba vodíku z vody, která bude využívat tepelnou energii z výfukových plynů, která se jinak běžně v automobilu ztrácí. Generátor bude z vody vyrábět vodík, který motor použije jako příměs do svého běžného paliva – nafty nebo benzínu. Množství vodíku zastoupeného v palivu by mělo být až 20% a o tuto hodnotu bude snížena spotřeba paliva, emise budou nižší až o 30%. Elektrovodíkový generátor bude možné instalovat jak do provozovaných automobilů, tak i nových automobilů. [26]



Obr. 35 Tepelné zatížení výfukového potrubí [26]

## 4 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ÚPRAV KONVENČNÍHO MOTORU

Pro snížení zátěže životního prostředí, které automobilová doprava v moderním světě přináší, je nutno snížit obsah škodlivých látek v ovzduší, obsažených ve výfukových plynech spalovacích motorů, ale také snížit spotřebu pohonných hmot získávaných z uhlovodíkových paliv, které jsou producentem skleníkových plynů, tedy oxidu uhličitého. V dnešní době je součástí každého moderního auta například katalyzátor nebo také pomocí elektronické řídicí jednotky, vstřikovačů a celé řady čidel a senzorů zajištěno přesné dávkování směsi do motoru, vedoucí ke snížení škodlivých emisí dle zákonných norem a hospodárnému chodu motorů s dosažením vysokých jízdních výkonů.[6]

### 4.1 POŽADAVKY NA SPALOVACÍ MOTOR

#### Kompresní poměr

Pro stupeň tepelné účinnosti motoru má rozhodující vliv právě kompresní poměr, kdy proti zavedení vysokého kompresního poměru stojí především dva faktory a to: vyšší sklon ke klepání a vyšší emise škodlivých plynů. Důvodem je vzestupná hodnota teploty ve spalovacím prostoru se stoupajícím kompresním poměrem. To zapříčiňuje předčasné reakce paliva k samozapálení oblasti palivové směsi, dříve než jsou dosaženy normálně se šířícím plamenem. Zvýšený sklon ke klepání si vyžaduje vyšší oktanové číslo paliva, popřípadě se dá částečně potlačit vhodným uspořádáním spalovacího prostoru. [6]

#### Tvar spalovacího prostoru

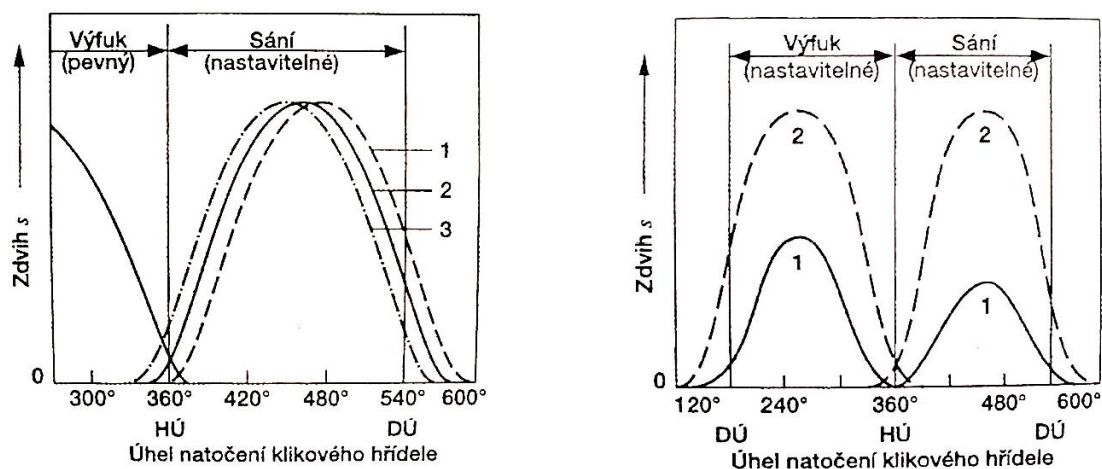
Hodnotu nespálených uhlovodíků ve výfukových plynech výrazně ovlivňuje tvar spalovacího prostoru. Důvodem jsou emise nespálených uhlovodíků, které vznikají ze sloupců a vrstev poblíž stěny válců, způsobují složité spalovací prostory s vysokým poměrem povrchu zvýšený vznik emisí HC. Výhodné jsou proto hlavně kompaktní spalovací prostory s malým povrchem. Ty dobře redukují díky intenzivní turbulenci při vyplňování spalovacího prostoru a rychlému spalování nárok na oktanové číslo. To umožňuje při použití vyššího kompresního poměru jednodušeji realizovat koncepci motorů s chudou směsí. Dosahují se tím nižších hodnot škodlivých emisí ve výfukových plynech a dobrého stupně účinnosti. Vzniklá turbulence je důležitá pro zapálení směsi paliva a vzduchu v blízkosti zapalovací svíčky. [6]

## Poloha zapalovací svíčky

Zapalovací svíčka má v prostoru spalovacího prostoru značný vliv na spotřebu a tvorbu škodlivých emisí zejména její poloha. Centrální poloha s krátkou dráhou plamene vede k rychlé a relativně úplné přeměně nespálených uhlovodíků, což má za výsledek nízké hodnoty škodlivých emisí. Ještě lepší je užití dvou zapalovacích svíček v jednom spalovacím prostoru pro ještě kratší dráhu plamene vychází ještě nižší spotřeba paliva a emise. Dále dochází u kompaktního spalovacího prostoru s centrální zapalovací svíčkou i dvěma k redukci nároku motoru na oktanové číslo. To dovoluje použít vyšší kompresní poměr a účinnost motoru. Veliká výhoda se vytváří pro víceventilové motory, kde se vytváří kompaktní spalovací prostor a uspořádání pro příznivé vyplachování válce. [6]

## Časování ventilů

Vyplachování válců za čerstvou směs probíhá za vhodného otevírání a zavírání sacích a výfukových ventilů. Otevírání ventilů je dán tvarem vačkové hřídele, která určuje časování ventilů tedy konkrétní okamžiky jejich otevření a zavření sacích a výfukových ventilů. Množství čerstvého vzduchu určuje výkon a točivý moment motoru, přitom podíl zbytku výfukových plynů, který nebyl při výměně vytlačen, ovlivňuje zapálení a spalování směsi. Podíl spálených výfukových plynů ve válci je důležitý pro stupeň účinnosti a hodnotu emisí nespálených uhlovodíků a oxidů dusíku. V okamžiku překrytí výfukového a sacího ventilu, tedy kdy jsou oba ventily otevřeny, může v závislosti na tlakových poměrech proudit čerstvá směs do výfuku nebo nespálená zpět do sání. Toto procházení plynů ovlivňuje stupeň účinnosti a emise nespálených uhlovodíků. Proto je výhodné užití časování ventilů v závislosti na otáčkách motoru. Takovýto systém využívá dvou vačkových hřídelí, kdy se pootáčí s vačkovou hřídelí sacích ventilů, to umožní delšího překrytí ventilů ve vyšších otáčkách a tím pádem vyššího výkonu a dobrého chodu motoru. V nižších otáčkách naopak s kratším překrytím ventilů ke snížení emisí nespálených uhlovodíků. [6]



Obr. 36 Schéma variabilního časování ventilů [27]



## **Systém sání**

Výplach válců je ovlivněn časováním ventilů, ale také uspořádáním sacího a výfukového potrubí. Při sacím zdvihu pístu v sacím potrubí dochází k periodicky kolísání tlaku. Tlakové vlny probíhají sacím potrubím ke konci potrubí, kde se odrazí a tlaková vlna míří zpět směrem k sacímu ventilu, který je před ukončením sacího zdvihu. Tímto přetlakovým efektem se dostane do válce více čerstvé směsi. [6]

## **4.2 ÚPRAVY KONVENČNÍHO ZÁŽEHOVÉHO MOTORU**

### **4.2.1 NÁVRH S PŘÍMÍM VSTŘIKEM VODÍKU**

Na úpravu konvenčního zážehového motoru, aby bylo možné spalovat zároveň benzín s vodíkem, bude navrženo několik úprav pro chod motoru s nejvyšší možnou účinností a zároveň odstraněno nebezpečí zpětného šlehnutí do sacího potrubí, které je největším nebezpečím u vodíkového motoru. Pro tento návrh úprav je ovšem nutnou podmínkou zásah do konstrukce hlavy válců. Je vycházeno z vlastností vodíku, které jsou popsány v předešlých kapitolách. Benzínová palivová soustava by zahrnovala už standardní vícebodové vstřikování benzínu s umístěným vstřikovacím ventilem před vstupem do válce u sacího ventilu. Kdy hlavním palivem automobilu této koncepce bude benzínová směs a k ní přidáván vodík po uzavření sacího ventilu, tedy při kompresním zdvihu.

- Umístění do hlavy válce spalovacího prostoru vstřikovací ventil pro přímý vstřik vodíku pro eliminování nebezpečných zpětných zášlehů do sacího potrubí vznikajících kontaktem čerstvé náplně se zbytky výfukových plynů.
- Použití přeplňování pro dosažení vyšší účinnosti.
- Použití variabilního časování otevírání ventilů, pro účinnější vyplachování spalovacího prostoru.
- Použití proměnlivého systému sacího potrubí pro účinnější plnění válce čerstvým vzduchem v případě vynechání přeplňování motoru.

Automobil s takovouto koncepcí navrženého motoru by vyžadoval dvě oddělené palivové soustavy, což by vyžadovalo zmenšení zavazadlového prostoru o instalaci vodíkové nádrže. Nutno ovšem podotknout, že v tomto případě by měl automobil jako hlavní palivo benzín, ke kterému se přidává vodík, tedy nádrž by nemusela mít velký obsah jako u automobilů poháněných výhradně vodíkem z důvodu již zmiňované malé objemové výhřevnosti vodíku. Motor by spaloval z hlavní části benzín a přidáním vodíku by motor získal klidnější a tišší chod díky dobrému promíšení plynného vodíku s již nasátou směsí benzínu a vzduchu. Kde zápalnost a rychlosti hoření plamene vodíku je velice dobrá a je předpokladem pro ideální spálení všech uhlovodíků ve směsi a tím zvýšil výkon motoru. Připomeňme, že rychlost hoření vodíku je závislá na jeho množství, tedy menší množství vodíku ve válci by zaručoval, že by nedošlo k příliš rychlému vyhoření směsi paliva. S ideálním spalováním se sníží škodlivé emise výfukových plynů a spotřeba paliva.

K zásadní nevýhodě takto řešené koncepce automobilu, patří zatím stále neexistující plošná infrastruktura čerpacích stanic s vodíkem. Bohužel i pořizovací cena automobilu s dvojitým palivovým systémem jistě sehraje také svoji zásadní roli při rozhodování pořízení dražšího byť ekologičtějšího řešení.

#### 4.2.2 NÁVRH SE SMĚŠOVAČEM VODÍKU

V další možnosti úpravy konvenčního zážehového motoru spalující benzín, a která by nevyžadovala zásah do stávající konstrukce motoru, je přidání směšovače pro míšení vodíku do směsi benzínu a vzduchu umístěný za filtr vzduchu a škrtkovací klapku, kde hlavním palivem by byl benzín vstřikován centrálním vstřikováním. Podtlak vyvolávaný sacím zdvihem pístu motoru přisává vodík do proudu vzduchu a benzínu v sacím potrubí, kde dochází k jeho promíchání a nasátí do válce. Ke zvýšení bezpečnosti bude motor vybaven čidlem a elektromagnetickým ventilem pro rychlé uzavření přívodu vodíku do sání v případě zpětného šlehnutí do sacího potrubí.

Tato varianta úpravy by přinesla motoru stejné charakteristiky jako v předchozím řešení, avšak zde může dojít k zpětnému šlehnutí do sacího potrubí. Důvodem je již zmiňovaný kontakt čerstvé směsi s výfukovými plyny při vyplachování spalovacího prostoru válce v průběhu překrytí otevřených výfukových a sacích ventilů.



Obr. 37 Směšovač – Mix Renault Megane LPG, CNG [28]

## 5 REALIZACE

Další částí této práce je stanovení vlivu příměsi vodíku ve spalovacím zážehovém motoru na reálném zařízení.

### 5.1 VÝROBA VODÍKU

K výrobě vodíku byl použit proces elektrolýzy, která rozkládá vodu na atomy vodíku a kyslíku. Elektrická energie byla odebírána z rozvodné sítě 220V. Pro zvýšení vodivosti mezi elektrodami elektrolyzáru byl přidán do destilované vody Hydroxid draselný (KOH).



Obr. 38 Elektrolyzér

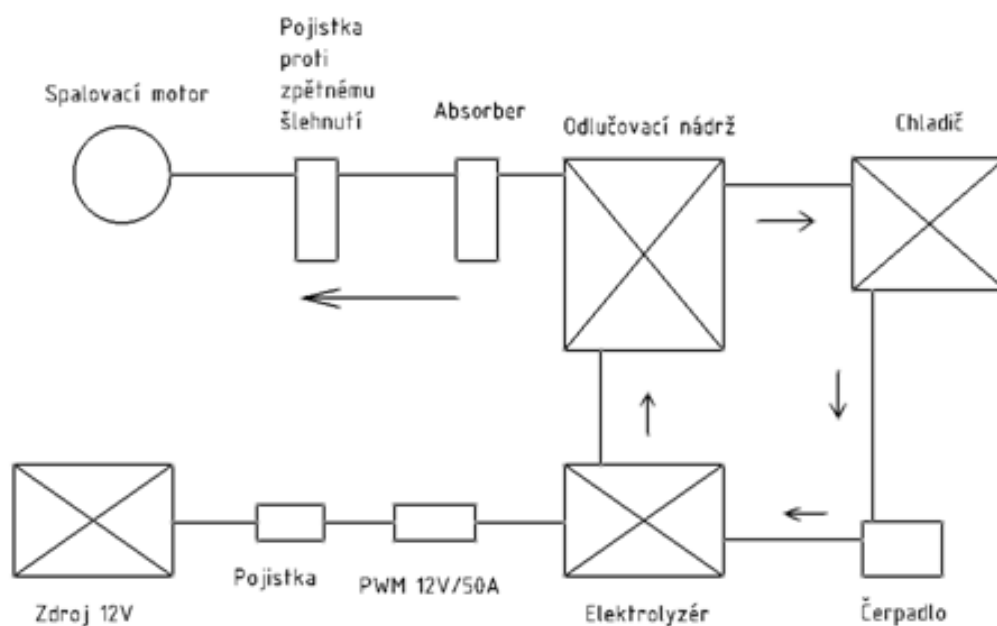
Množství vyvíjeného Brownova plynu, tedy dvou molekul vodíku a jedné molekuly kyslíku byl naměřen v průtoku 2,2 litrů plynu za jednu minutu při 80% proudovém zatížení elektrolyzáru (40A). Pro propojení jednotlivých částí zařízení bylo zvoleno chemicky odolné a nehořlavé silikonové hadice. Prevence proti poškození zařízení a bezpečnosti osob k vniknutí plamene v případě zpětného zášlehu do sacího potrubí motoru, je na výstupu systému přidána pojistka proti průchodu plamene do odlučovací nádrže a elektrolyzáru. Systém neobsahuje žádnou nádrž, kde by byl plyn skladován. Vyvíjený vodíkový plyn je hned využit.



K nevýhodě konstrukce použitého elektrolyzáru patří především absence diafragmy, která odděluje vodík od kyslíku. Kyslík by byl odváděn odpadním kanálem do ovzduší. V tomto případě se nám vyskytuje v systému jak vodík, tak i kyslík, čímž nám vzniká velké riziko exploze při neopatrném zacházení.

Elektrolyzáru a hlavní komponenty:

- Zdroj stejnosměrného napětí – Mean Well AC/DC  $U = 12\text{ V}$ : napětí  
 $P = 600\text{ W}$ : výkon  
 $I = 50\text{ A}$ : proud
- Pulzní zdroj – HHO PWM 12V / 70A
- Elektrolyzáru – DC 12V bipolární zapojení elektrod
- Odlučovací nádrž
- Chladič elektrolytu
- Oběhové čerpadlo
- Absorber
- Pojistka proti zpětnému šlehnutí (Bubler)

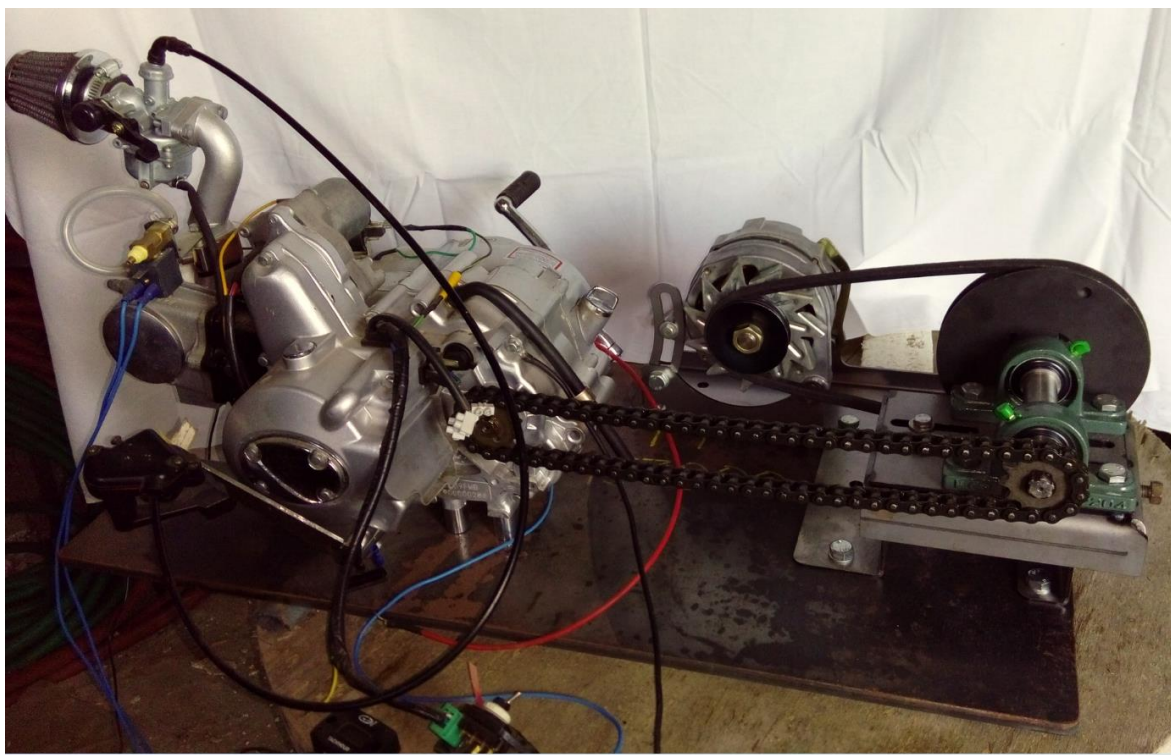


Obr. 39 Schéma zapojení elektrolyzáru

## 5.2 SPALOVACÍ MOTOR

K reálnému testu vlivu příměsí vodíku v pístovém spalovacím motoru byl vybrán jednoválcový čtyřtaktní zážehový motor čínské výroby vycházející z konceptu motoru japonského výrobce Honda:

- Typ FMB 139
- Zdvihový objem 50 cm<sup>3</sup>
- Maximální otáčky motoru 7200 ot/min
- Výkon udávaný výrobcem 2,2 kW.



Obr. 40 Zážehový spalovací motor

## 5.3 PROVEDENÉ ÚPRAVY

- Motor byl osazen solenoidovým ventilem, který je uzavřen bez napětí. Přidáním ventilu je umožněno rychlé uzavření přívodu vodíku do motoru.
- Pro mísení vodíku se vzduchem je přidán do sacího potrubí směšovač, který je instalován u hlavy válce, zároveň tedy i v blízkosti sacího ventilu.
- Standardní sériová zapalovací svíčka byla nahrazena za iridiovou pro silnější výboj.



Obr. 41 Směšovač vodíku

Pro odečítání aktuálních otáček motoru byl instalován snímač otáček, který sleduje impulzy na kabelu zapalovací svíčky.



Obr. 42 Snímač otáček

## 5.4 VLIV PŘÍMĚSI VODÍKU

Zážehový motor při spalování benzínu musí vykazovat klidný plynulý chod při každém režimu zatížení a to i při jeho přechodech. Motor vybavený karburátorem tvoří palivovou směs benzínu a vzduchu už v sacím potrubí, tedy dochází k tvoření směsi mimo spalovací prostor a s kompresním zdvihem je už rozprášené palivo v podobě kapiček přeměněno do plynné podoby. Spalování paliva a celý tento fyzikálně chemický průběh se periodicky opakuje v krátkých intervalech a závisí na několika faktorech jako teplota, tlak, složení směsi a bod zapálení směsi.

Sledovaný motor se při spalování benzínu při volnoběžných otáčkách pohyboval v rozmezí 2350 až 2050 ot/min. Z toho je patrné, že otáčky motoru kolísaly v rozmezí 300 otáček, tedy motor vykazoval neklidný chod a to po celou dobu sledování 9:40 minut. V tomto čase byl spotřebován benzín, který se nacházel v plovákové komoře karburátoru. Toto množství benzínu o 34 ml sloužilo jako reference k odečítání času. Motor pracoval v nezatíženém stavu, tedy mu nebyl odebírán jinak výkon.

Za zcela stejných podmínek jako v předchozím případě byl do benzínové směsi směšovačem přidán vodík otevřením elektromagnetického ventilu z elektrolyzéru. Přidáním vodíku do směsi se skokově změnila otáčky motoru a pohybovaly se v oblasti rozmezí 4300 až 4200 ot/min bez žádného dalšího zásahu v nastavení. Motor vykazoval tlumenější zvuk a rozdíl otáček se měnil zcela plynule po dobu 8:10 minut, kdy se benzín spotřeboval a otáčky motoru, začaly klesat, byl uzavřen i elektromagnetický ventil. Délka chodu motoru s vodíkem se zkrátila o 90 sekund. Proud byl při elektrolýze nastaven na 30 A. Po celou tuto dobu pracoval spalovací motor s přidáním vodíkem v naprosto klidném chodu bez negativního chování.

Palivo	Volnoběžné otáčky	Čas chodu motoru	Zatížení elektrolyzéru
	[ot/min]	[min]	[A]
Benzín	2050 - 2350	9:40	-
Benzín + Vodík	4200-4300	8:10	30

Tab. 4 Vliv příměsi vodíku v zážehovém motoru

Spalovací motor byl pozorován pokaždé se stejným výsledkem chodu s příměsí vodíku v benzínovém palivu, což jasně dokazuje, že přidání vodíku mělo zásadně dobrý vliv na průběh spalování, otáčky motoru a kultivovaný chod. Obávaný zášleh do sacího potrubí se během chodu nevznikl a ani jiný negativní postřeh zaznamenaný nebyl. Z tohoto důvodu by se dalo usoudit, že přidání vodíku do benzínové palivové směsi nepřináší nebezpečí v podobě šlehnutí do sacího potrubí. S tímto tvrzením se ovšem nedá souhlasit v případě, kdy bude motor v kriticky nízkých otáčkách, například v bodě, kdy dochází hlavní složka směsi, tedy benzín. V jednom případě zášleh do sacího potrubí byl zaznamenán. Stejný jev byl zaznamenán při pokusu spustit motor bez přítomnosti benzínu. Zášleh do sacího potrubí se projevil jako ohlušující exploze plynu s viditelným zábleskem, který vyšlehl skrze vstupní hrdlo karburátoru a filtr sání. Záblesk plamene byl zpozorován i v silikonové hadici připojené od elektrolyzéru do směšovače, kde je přidána pojistka proti průchodu plamene na jeho ústí v podobě bronzové vlny, která se projevila jako nedostatečná. Průchod plamene v silikonové hadičce byl zapříčiněn jednak nespolehlivou pojistkou proti zpětnému šlehnutí plamene a za druhé přítomností kyslíku z elektrolýzy. Postupující plamen bezpečně zastavil až druhý



vsazený prvek proti prostupu plamene. Ten se skládá z válce částečně zaplněným vodou, přes který probublává vodík s kyslíkem přivedený z elektrolyzéru. Plamen se zastaví o hladinu vody a je uhašen, tím je průchod dál znemožněn.

K samotná příčině zášlehu do sacího potrubí významně přispěla vysoká reaktivita vodíku s některým horkým místem části motoru, kde iniciaci mohla způsobit horká zapalovací svíčka, horký výfukový ventil nebo kontakt se zbytkem výfukových plynů. Právě poslední z uvedených je nejpravděpodobnější příčinou, protože velmi nízké otáčky motoru umožnily dlouhé překrytí výfukového a sacího ventilu, kde došlo ke kontaktu horkých výfukových plynů s čerstvou směsí. Také malé množství vodíku přivedeného do motoru nemohlo motoru poskytnout dostatečnou rychlost pístu k vytlačení spálených horkých plynů ze spalovacího prostoru.



## 6 ZÁVĚR

Obsah práce je zaměřen na stanovení vlivu příměsi vodíku v zážehovém spalovacím motoru. Bylo vycházeno z vlastností vodíku a k tomu v rámci řešerše návrh možných konstrukčních úprav zážehového motoru pro použití spalování směsi vodíku s benzínem. Na základě těchto navržených úprav konvenčního motoru byl následně realizován reálný pokus, ze kterého vyšlo jasně najevo, jaký viditelný efekt motoru přinesl přidaný vodík a to zejména kultivovaný chod, nárůst otáček a výkonu. Používání vodíku je všeobecně spojeno se zvýšenými nároky na bezpečnost, materiály a manipulaci jak při jeho skladování, tak i při jeho výrobě a aplikaci. Tento reálný pokus příměsi vodíku předvedl jeho klady i zápory. Jedním z nich je šlehnutí plamene do sacího potrubí, na kterém byla popsána i možná příčina tohoto nebezpečného jevu. Nutno dodat, že pro realizaci byly použity pouze možné dostupné součástky, které se podařily zajistit nebo svépomocí vyrobit, což nemohlo dostatečně odstranit rizika spojená s používáním vodíku.

Používáním příměsi vodíku k současně nejvíce používaným konvenčním palivům by vedlo ke snížení škodlivých emisí v ovzduší, ale také ke snížení závislosti na vysokém objemu těžby ropy. V kombinaci s některým zástupcem biopaliva a vodíku se může automobilová doprava stát čistou ekologickou formou osobní dopravy. Jako ideální způsob výroby vodíku s jeho okamžitým využitím ke spalování vidím řešení u již zmiňované firmy OM Energy, kde se bude vyrábět vodík z odpadního tepla výfukových plynů automobilu, čímž se zvýší účinnost motoru a sníží emise. Tento systém může také vyplnit čas do doby, kdy bude dostatečně vybudována chybějící infrastruktura vodíkového hospodářství a dostanou hlavní slovo čisté vodíkové spalovací motory nebo palivové články, kde jejich užíváním bude čisté ovzduší a kondenzát vody.



## 7 POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Vodík: Wikipedia otevřená encyklopedie [online]. 10.3.2015 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADk>
- [2] Elektrolýza. Webchemie [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.webchemie.cz/elektrolyza.html>
- [3] Galleryhip: Hydrogen Deuterium. *Galleryship* [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://galleryhip.com/hydrogen-deuterium.html>
- [4] Hytep: Výroba vodíku. [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/491-vyroba-vodiku>
- [5] Petroleum: Výroba vodíku parním reformováním. [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [6] Vlk, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. Mokrohorská 34, 644 00 Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vykladatelství, 1. vydání, Brno 2006. ISBN 80-239-6461-5.
- [7] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. *Automobilová paliva*. 1. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0350-5.
- [8] Povrcháři. *Www.povrchari.cz* [online]. 2008 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/kestazeni/200801\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/200801_povrchari.pdf)
- [9] Htep: Bezpečnost. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. Husinec-Řež: Česká vodíková technologická platforma, 2007 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/bezpecnost/482-bezpecnost>
- [10] HYTEP: Skladování vodíku I. DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *HYTEP* [online]. 2007, 17.5. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/495-skladovani-vodiku-i>
- [11] Skladování vodíku II. DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *HYTEP* [online]. 2007, 29.5. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/494-skladovani-vodiku-ii>
- [12] François Isaac de Rivaz: Interna combustion engine. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Fran%C3%A7ois\\_Isaac\\_de\\_Rivaz](http://en.wikipedia.org/wiki/Fran%C3%A7ois_Isaac_de_Rivaz)
- [13] *The Rev. W. Cecil's Engine* [on-line]. Vydáno: 2002 [citováno 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/projects/cecil/engine.html>
- [14] Vodíkové spalovací motory. *Hytep* [online]. Husinec-Řež: Hytep, 2007 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/657-vodikove-spalovaci-motory>





- 
- [15] HYTEP: Vodík jako úschovna energie. 2015. VLČKOVÁ, Eva. *HYTEP* [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/587-vodik-jako-uschovna-energie>
- [16] Hydrogen use in internal combustion engines. In: U.S. Department of energy: Energi efficiency and Renewable energy [online]. 2001 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech\\_validation/pdfs/fcm03r0.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf)
- [17] High-Pressure Direct-Injection Hydrogen Engine Achieves Efficiency of 42%; On Par with Turbodiesels. 2009. *Green car congress* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.greencarcongress.com/2009/03/high-pressure-d.ht>
- [18] Hydrogen Cars Now: BMW Hydrogen 7. KANTOLA, Kevin. *HydrogenCarsNow* [online]. 2005 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.hydrogencarsnow.com/bmw-hydrogen7.htm>
- [19] Hydrogen Cars Now: BMW HR2. KANTOLA, Kevin. *HydrogenCarsNow* [online]. 2005 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/bmw-hr2>
- [20] Ford F-250 Super Chiev. *Hydrogen Cars Now* [online]. Kevin Kantola [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/ford-super-chief-truck/>
- [21] BLANCO, S. Two Ford hydrogen H2ICE buses arrive at Detroit Metro airport[on-line]. Vydáno: 17.3.2008 [citováno 2016-04-19]. Dostupné z: < <http://www.autoblog.com/2008/03/17/two-ford-hydrogen-h2ice-buses-arrive-at-detroit-metro-airport>
- [22] Automobil Revue: Mazda RE Hydrogen - Jedeme na vodík !. *Automobil Revue* [online]. 2008 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: [http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/mazda-re-hydrogen-jedeme-na-vodik\\_32678.html](http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/mazda-re-hydrogen-jedeme-na-vodik_32678.html)
- [23] Mazda to Lease Rotary H2ICE, Add Mild Hybrid Support [on-line]. Vydáno: 15.10.2004 [citováno 2016-04-19]. Dostupné z: [http://www.greencarcongress.com/2004/10/mazda\\_to\\_lease\\_.html](http://www.greencarcongress.com/2004/10/mazda_to_lease_.html)
- [24] Motor Trend: Mazda Gets Clearance to Lease World's First Hydrogen Hybrid Read more: <http://wot.motortrend.com/mazda-gets-clearance-to-lease-worlds-first-hydrogen-hybrid-4277.html#ixzz3aL6UdDue>. *Motor trend* [online]. 2009 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://wot.motortrend.com/mazda-gets-clearance-to-lease-worlds-first-hydrogen-hybrid-4277.html>
- [25] H2 shop: Praktická instalace ve vozidle. *H2 shop* [online]. 2012 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.h2shop.cz/index.php?p=article&id=14>
- [26] Auta si budou sama vyrábět vodík, který budou spalovat. VOKÁČ, Luděk. *IDnes* [online]. 2010 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/auta-si-budou-sama-vyrabet-vodik-ktery-budou-spalovat-pff-/automoto.aspx?c=A100110\\_235321\\_automoto\\_vok](http://auto.idnes.cz/auta-si-budou-sama-vyrabet-vodik-ktery-budou-spalovat-pff-/automoto.aspx?c=A100110_235321_automoto_vok)





- 
- [27] Autolexikon: Variabilní časování ventilů. *Autolexikon* [online]. 2011 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.autolexikon.net/cs/articles/variabilni-casovani-ventilu/>
- [28] *Fedor Auto: LPG zařízení* [online]. Prostějov [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.fedorauto.cz/smesovac---mix-lpgcng?epc=683>



---

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A/F ratio	Poměr vzduch palivo
amu	Atomová hmotnostní jednotka
CO <sub>x</sub>	Oxid uhlíku
C <sub>x</sub>	Odpor vzduchu
Dual fuel	Spalování dvou paliv
E85	Etanol 75% + benzín 15%
EHG	Electro hydrogen generator
H	Vodík
H <sub>2</sub>	Molekule vodíku
HHO	Hydrogen + Hydrogen + Oxygen
HICE	Hydrogen internal combustion engine
NO <sub>x</sub>	Oxid dusíku
O <sub>2</sub>	Molekule kyslíku
PEM	Palivový článek
KOH	Hydroxid draselný